

ISSN (Print) 2616-7263
ISSN (Online) 2663-1261

Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университетінің

ХАБАРШЫСЫ

BULLETIN

of L.N. Gumilyov
Eurasian National University

ВЕСТНИК

Евразийского национального
университета имени Л.Н. Гумилева

ТЕХНИКАЛЫҚ ҒЫЛЫМДАР ЖӘНЕ ТЕХНОЛОГИЯЛАР сериясы

TECHNICAL SCIENCES AND TECHNOLOGY Series

Серия ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ И ТЕХНОЛОГИИ

№1 (154)/ 2026

1995 жылдан бастап шығады

Founded in 1995

Издается с 1995 года

Жылына 4 рет шығады

Published 4 times a year

Выходит 4 раза в год

Астана, 2026

Бас редакторы: Тогизбаева Б.Б.

т.ғ.д., профессор, Л.Н. Гумилев атындағы ЕҰУ, Астана, Қазақстан

Бас редактордың орынбасары **Жусупбеков А.Ж.**, т.ғ.д., профессор,

Л.Н.Гумилев атындағы ЕҰУ, Астана, Қазақстан

Жауапты редактор

Закирова А.Б., қауымдастырылған профессор,

Л.Н.Гумилев атындағы ЕҰУ, Астана, Қазақстан

Редакция алқасы

Levente Kovács	Профессор, Обуда университеті, Мажарстан
Aljawarneh Shadi A.	Профессор, Иордания ғылым және технология университеті, Иордания
Milani Alfredo	Профессор, Перуджио университеті, Италия
Rafal Burdzik	Профессор, Силезиялық технологиялар университеті, Польша
Akitoshi Mochizuki	Профессор, Токусима университеті, Жапония
András Molnár	Профессор, Обуда университеті, Мажарстан
Der Wen Chang	Профессор, Тамканг Университеті, Тайвань
Yoshinori Iwasaki	Профессор, Гео зерттеу университеті, Жапония
Eun Chul Shin	Профессор, Ичхон ұлттық университеті, Оңтүстік Корея
Viktor Kaliakin	Профессор, Делавер Университеті, АҚШ
Рустем Сахапов	Профессор, Казан мемлекеттік университет, Ресей
Tadatsugu Tanaka	Профессор, Токио Университеті, Жапония
Hoe Ling	Профессор, Колумбия университеті, АҚШ
Гульмира Бекманова	Профессор, Л.Н.Гумилев атындағы ЕҰУ, Астана, Қазақстан
Елбек Утепов	Профессор, Л.Н.Гумилев атындағы ЕҰУ, Астана, Қазақстан
Асель Тулебекова	Профессор, Л.Н.Гумилев атындағы ЕҰУ, Астана, Қазақстан
Бану Ергеш	Қауымдастырылған профессор, Л.Н.Гумилев атындағы ЕҰУ, Астана, Қазақстан
Рахима Чекаева	Профессор, Л.Н.Гумилев атындағы ЕҰУ, Астана, Қазақстан
Жанболат Шахмов	Профессор, Л.Н.Гумилев атындағы ЕҰУ, Астана, Қазақстан
Михаил Жумагулов	Қауымдастырылған профессор, Л.Н.Гумилев атындағы ЕҰУ, Астана, Қазақстан
Данияр Базарбаев	PhD, ТОО «Solid Research Group», Астана, Қазақстан
Алия Забиева	Қауымдастырылған профессор, Л.Н.Гумилев атындағы ЕҰУ, Астана, Қазақстан

Редакцияның мекен жайы: 010008, Қазақстан, Астана қ., Сәтбаев к-сі, 2,

Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, 402 б.

Тел.: +7 (7172) 709-500, (ішкі: 31-315). **E-mail:** vest_techsci@enu.kz

Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университетінің Хабаршысы

ТЕХНИКАЛЫҚ ҒЫЛЫМДАР ЖӘНЕ ТЕХНОЛОГИЯЛАР сериясы

Меншіктенуші: КеАҚ "Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті"

Мерзімділігі: жылына 4 рет

Қазақстан Республикасының Ақпарат және коммуникациялар министрлігімен тіркелген

19.04.2021 ж. № KZ31VPY00034682 қайта есепке қою туралы куәлігі

Типографияның мекенжайы: 010008, Қазақстан, Астана қ., Қажымұқан к-сі 13/1

Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті

Тел: +7 (7172)709-500 (ішкі 31-315). Сайт: <http://bultech.enu.kz>

Editor-in-Chief: Baglan Togizbayeva

professor, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan

Deputy Editor-in-Chief

Askar Zhussupbekov, *professor*,

L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan

Executive editor

Alma Zakirova, *associate professor*,

L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan

Editorial board

Levente Kovács	Prof., Óbuda University, Budapest, Hungary
Aljawarneh Shadi A.	Prof., Jordan University of Science and technology, Jordan
Milani Alfredo	Prof., University of Perugia
Rafal Burdzik	Prof., Silesian university of technology, Poland
Akitoshi Mochizuki	Prof., University of Tokushima, Tokushima, Japan
András Molnár	Prof., Óbuda University, Budapest, Hungary
Der Wen Chang	Prof., Tamkang University, Taipei, Taiwan (ROC)
Yoshinori Iwasaki	Prof., Geo Research Institute, Osaka, Japan
Eun Chul Shin	Prof., Incheon National University, Incheon, South Korea
Viktor Kaliakin	Prof., University of Delaware, Newark, Delaware, USA
Pyctem Caxaпov	Prof., Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan
Tadatsugu Tanaka	Prof., University of Tokyo, Tokyo, Japan
Hoe Ling	Prof., Columbia University, New York, USA
G.Bekmanova	Prof., L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan
Y.Utepov	Prof., L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan
A.Tulebekova	Prof., L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan
B.Yergesh	Assos.Prof., L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan
R.Chekayeva	Prof., L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan
Zh.Shakhmov	Prof., L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan
M.Zhumagulov	Assos.Prof., L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan
D.Bazarbayev	PhD, TOO «Solid Research Group», Astana, Kazakhstan
A.Zabiyeva	Assos.Prof., L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan

Editorial address: 2, Satpayev str., of. 402,

L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan, 010008

Tel.: +7 (7172) 709-500, (ext. 31-315), **E-mail:** vest_techsci@enu.kz

Bulletin of L.N. Gumilyov Eurasian National University

TECHNICAL SCIENCES and TECHNOLOGY Series

Owner: Non-profit joint-stock company «L.N. Gumilyov Eurasian National University»

Periodicity: 4 times a year

Registered by the Ministry of Information and Communication of the Republic of Kazakhstan

Rediscount certificate № KZ31VPY00034682 from 19.04.2021

Address of Printing Office: 13/1 Kazhimukan str., Astana, Kazakhstan 010008

L.N. Gumilyov Eurasian National University

Tel: +7 (7172) 709-500 (ext.31-315). Website: <http://bultech.enu.kz>

Главный редактор: Тогизбаева Б.Б.

д.т.н., профессор, ЕНУ имени Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан

Зам. главного редактора

Жусупбеков А.Ж., д.т.н., профессор

ЕНУ имени Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан

Ответственный редактор

Закирова А.Б., ассоциированный профессор,

ЕНУ имени Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан

Редакционная коллегия

Levente Kovács	Профессор, Обуда университет, Венгрия
Aljawarneh Shadi A.	Профессор, Университет Науки и Технологии Иордании, Иордания
Milani Alfredo	Профессор, Университ Перуджио, Италия
Rafal Burdzik	Профессор, Силезский университет Технологии, Польша
Akitoshi Mochizuki	Профессор, университет Токусима, Япония
András Molnár	Профессор, Обуда университет, Венгрия
Der Wen Chang	Профессор, Тамканг Университет, Тайпей, Тайвань
Yoshinori Iwasaki	Профессор, Института Гео исследований, Осака, Япония
Eun Chul Shin	Профессор, Ичхонского национального университета, Южная Корея
Viktor Kaliakin	Профессор, Университет штата Делавэр, США
Рустем Сахапов	Профессор, Казанский государственный университет, Россия
Tadatsugu Tanaka	Профессор, Университет Токио, Япония
Hoe Ling	Профессор, Колумбийский университет, США
Гульмира Бекманова	Профессор, ЕНУ им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан
Елбек Утепов	Профессор, ЕНУ им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан
Асель Тулебекова	Профессор, ЕНУ им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан
Бану Ергеш	Ассоц. профессор, ЕНУ им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан
Рахима Чекаева	Профессор, ЕНУ им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан
Жанболат Шахмов	Профессор, ЕНУ им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан
Михаил Жумагулов	Ассоц. профессор, ЕНУ им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан
Данияр Базарбаев	PhD, ТОО «Solid Research Group», Астана, Казахстан
Алия Забиева	Ассоц. профессор, ЕНУ им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан

Адрес редакции: 010008, Казахстан, г. Астана, ул. Сатпаева, 2,
Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, каб. 402
Тел.: +7(7172) 709-500, (вн. 31-315). **E-mail:** vest_techsci@enu.kz

Вестник Евразийского национального университета имени Л.Н. Гумилева
Серия ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ И ТЕХНОЛОГИИ

Собственник: НАО «Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева» Периодичность:
4 раза в год

Зарегистрирован Министерством информации и коммуникаций Республики Казахстан Свидетельство
о постановке на переучет № KZ31VPY00034682 от 19.04.2021 г.

Адрес типографии: 010008, Казахстан, г. Астана, ул. Кажымукана, 13/1,

Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева

Тел.: +7(7172)709-500 (вн.31-315). Сайт: <http://bultech.enu.kz>

Құрылыс
Construction
Строительство

Н. Трохутсу, К. Пилакутас, М. Гуаданьини Flax-TRM жүйелерінің созылу және жаншу-срез адгезиялық сынақтар N. Trochoutsou, K. Pilakoutas M. Guadagnini Tensile and shear bond tests on Flax-TRM systems	
Н. Трохутсу, К. Пилакутас, М. Гуаданьини Испытания на растяжение и сдвиг на системах Flain-TRM.....	9
Л.Т.Кабдырова, Р.Е. Лукпанов, Ф.Б. Абдушқуров, М. Караджасу Шинаның қысымына байланысты жанасу нүктесі бойынша автокөлік дөңгелегінен модельдік кернеулерді есептеу.....	
L.T. Kabdyrova, R.E. Lukpanov, F.B. Abdushkurov, M. Karacasu Calculation of model stresses from a motor vehicle wheel on the contact patch, depending on tire pressure.....	
Л.Т.Кабдырова, Р.Е. Лукпанов, Ф.Б. Абдушқуров, М. Караджасу Расчет модельных напряжений от колеса автотранспорта по пятну контакта в зависимости от давления в шине.....	23
А.С. Тулебекова, Н.Ф.Денисова, Б.Кастрати Цифрлық топырақ елеу симуляциясы: зертханалық үдерісті визуализациялау және практикалық маңыздылығы.....	
A.Tulebekova, N. Denissova, B. Kastrati Digital simulation of soil sieve analysis: visualization of the laboratory process and practical relevance.....	
А.С.Тулебекова, Н.Ф.Денисова, Б.Кастрати Цифровая симуляция ситового анализа грунта: визуализация лабораторного процесса и практическая значимость.....	35
Р. Шегенбаева, Е. Бесимбаев, А. Шадкам, С. Ниетбай Жер сілкінісі әсерін төмендетуге арналған геотехникалық сейсмоқорғаудың (GSI) сенімділігі.....	
R. Shegenbayeva, Y. Bessimbayev, A. Shadkam, S. Niyetbay Reliability of Geotechnical Seismic Isolation (GSI) for Reducing Earthquake Effects.....	
Р. Шегенбаева, Е. Бесимбаев, А. Шадкам, С.Ниетбай Надежность геотехнической сейсмоизоляции (gsi) для снижения воздействий землетрясения.....	49

Сәулет
Architecture
Архитектура

М.Х.Батырова, Г.Д.Мауленова

Университет кампустарын жобалаудың әлемдік тәжірибесі және заманауи үрдістері.....

M.Kh. Batyrova, G.D. Maulenova

Global Experience and Contemporary Trends in University Campus Design.....

М.Х.Батырова Г.Д.Мауленова

Мировой опыт и современные тенденции проектирования университетских кампусов..... 66

Н.Ж. Ақжігіт, С.Ш.Садыкова

Қоғамдық және мәдени кеңістіктерді құрудағы аспалы құрылымдардың рөлі.....

N.Zh Akzhigit, S.Sh.Sadykova

The role of cable-stayed structures in the creation of public and cultural spaces.....

Н.Ж. Ақжігіт, С.Ш. Садыкова

Роль вантовых конструкций в создании общественных и культурных пространств.. 84

Д.Е.Сарсембаева

Астана қаласының сауда объектілерінің даму ерекшеліктері.....

Д.Е.Сарсембаева

Особенности развития торговых объектов города Астаны.....

D.Y.Sarsembayeva

Features of the development of retail facilities in Astana..... 102

Көлік
Transport
Транспорт

Н.А. Долженко, О.В. Гармаш

Ұшу қауіпсіздігін қамтамасыз ету саласында авиациялық персоналды даярлауды математикалық модельдеу.....

N. Dolzhenko, O.Garmash

Mathematical modeling of aviation personnel training in the field of flight safety.....

Н.А. Долженко, О.В. Гармаш

Математическое моделирование подготовки авиационного персонала в сфере обеспечения безопасности полетов..... 115

М.Ә. Жуманов, Қ.Д. Байжуманов, Н.С. Камзанов, Е.Б. Калиев, Р.А.Козбагаров

Тиімді әдістерді таңдау арқылы TORO-40D шахта өзітөкіштерінің жұмысқабілеттілігін арттыру.....

M.A. Zhumanov, K.D. Baizhumanov, N.S. Kamzanov, Ye.B. Kaliyev, R.A. Kozbagarov

Improving the performance of TORO-40D mining dump trucks by selecting rational methods.....

М.А. Жуманов, К.Д. Байжуманов, Н.С. Камзанов, Е.Б. Калиев, Р.А. Козбагаров

Повышение работоспособности шахтных самосвалов TORO-40D путем выбора рациональных методов..... 132

М.Ж. Куатова, О. Кумархан, Д.Б. Акпанбетов, А.Ж. Абекова Көлік құралдарының дірілдік диагностикасының зияткерлік жүйесінің архитектурасы және діріл сигналдарын талдау әдістемесі.....	
M.Zh. Kumatova, O. Kumarkhan, D.B. Akpanbetov, A.Zh. Abekova Architecture of an Intelligent Vibration Diagnostics System for Vehicles and Methodology for Vibration Signal Analysis.....	
М.Ж. Куатова, О. Кумархан, Д.Б. Акпанбетов, А.Ж. Абекова Архитектура интеллектуальной системы вибрационной диагностики транспортных средств и методика анализа вибрационных сигналов.....	149
Н.Қ. Ыбрай, М.С. Овчаров Іштен жану қозғалтқыштарын жөндеудің тиімділігін арттыру: машиналық оқытуға негізделген болжамды техникалық қызмет көрсету әдісі.....	
N.K. Ybray, M.S. Ovcharov Enhancing the Efficiency of Internal Combustion Engine Repair: A Machine Learning-Based Predictive Maintenance Approach.....	
Н.Қ. Ыбрай, М.С. Овчаров Повышение эффективности ремонта двигателей внутреннего сгорания: метод прогнозного технического обслуживания на основе машинного обучения.....	166
М.С.Исабаев, Б.К.Сарсембеков, Н.Б.Жаркенов, А.Т.Умбетжанова, Е.К.Сарсембек Ультрадыбыс пен лазерлік сәулеленудің біріктірілген әсері кезінде бензинді қозғалтқыштың шығарындылары газдарын тазалауды эксперименттік зерттеу.....	
M.S. Issabayev, B.K. Sarsembekov, N.B. Zharkenov, A.T. Umbetzhanova, Y.K. Sarsembekov Experimental Study of Exhaust Gas Purification from a Gasoline Engine under Combined Ultrasonic and Laser Radiation Effects.....	
М.С. Исабаев, Б.К. Сарсембеков, Н.Б. Жаркенов, А.Т. Умбетжанова, Е.К. Сарсембеков Экспериментальное исследование очистки выхлопных газов бензиновых двигателей при комбинированном воздействии ультразвука и лазерного излучения.....	185

Машина жасау
Mechanical engineering
Машиностроение

Ж.Ж. Жунусбекова Жер қазу машиналарының жұмыс органдарының морфологиялық талдауы және қозғалыс динамикасын математикалық модельдеу.....	
Zh.Zh. Zhunusbekova Morphological analysis of the working bodies of earthmoving machines and mathematical modeling of the dynamics of movement.....	
Ж.Ж. Жунусбекова Морфологический анализ рабочих органов землеройных машин и математическое моделирование динамики движения.....	203
Г.А. Смаилова, А.М. Алшынова, А.Е. Удербаяева, Ш. Кошанова, Е. Жаманқұлов Таратушы күштік трансформаторлар өндірісіндегі роботтандыру - заманауи технологиялар, Индустрия 4.0 артықшылықтары мен перспективалары.....	
G.A. Smailova, A.M. Alshynova, A.E. Uderbayeva, Sh. Koshanova, Y. Zhamankulov Robotization in the Production of Distribution Power Transformers - Technologies,	

Advantages and Prospects of Industry 4.0.....	
Г.А. Смаилова, А.М. Алишынова, А.Е. Удербаета, Ш.Кошанова, Е. Жаманқулов	
Роботизация в производстве распределительных силовых трансформаторов - технологии, преимущества и перспективы Индустрии 4.0.....	216
Г.Б. Хайытбаева, А.Ж.Мурзагалиев, Б.Т.Сазамбаева, Г.М.Ордабаева, Ж.Косыбаев	
Теміржол крандарының шығатын тіректерінің конструкциясын дамыту перспективалары.....	
G.B.Khayitbayeva, A.J. Murzagaliev, B.T.Sazambayeva, G.M. Ordabayeva, Z.Kossybayev	
Prospects for the development of the outrigger designs for railway cranes.....	
Г.Б. Хайытбаева, А.Ж.Мурзагалиев, Б.Т.Сазамбаева, Г.М.Ордабаева, Ж.Косыбаев	
Перспективы развития конструкции выносных опор железнодорожных кранов.....	229

Есептеу техникасы
Computer science
Вычислительная техника

Ә.Қ. Әйтiм, М.А. Абдулла	
<i>Жетiлдiрiлген көңiл-күйдi талдау арқылы пайдаланушы тәжiрибесiн жақсарту.....</i>	
A.K.Aitim , M.A.Abdulla	
Enhancing user experience through advanced sentiment analysis.....	
Ә.Қ. Әйтiм, М.А. Абдулла	
Повышение пользовательского опыта за счет расширенного анализа настроений....	249



IRSTI 06.81.23

<https://doi.org/10.32523/2616-7263-2026-154-1-9-22>

Article

Tensile and shear bond tests on Flax-TRM systems

N. Trochoutsou , K. Pilakoutas , M. Guadagnini* 

School of Mechanical, Aerospace and Civil Engineering University of Sheffield, Sheffield, Great Britain

*E mail: niki.trochoutsou@polimi.it, * m.guadagnini@sheffield.ac.uk, k.pilakoutas@sheffield.ac.uk*

Abstract. This paper presents the preliminary results of an experimental programme investigating the bond behaviour between natural fibre Textile Reinforced Mortar (TRM) composites and masonry substrates. The TRM system used in the study consisted of one and two layers of flax textile reinforcement embedded within a lime-based mortar matrix, selected due to its compatibility with historic and traditional masonry materials. The mechanical performance of the textile–matrix composite, as well as its interaction with the masonry substrate were evaluated through a series of laboratory tests. These included direct tension tests to determine the tensile capacity and behaviour of the composite, and single-lap shear bond tests to assess the bond strength and stress transfer at the TRM–masonry interface. The results obtained from both test programmes are analysed and discussed in detail, highlighting the main parameters influencing bond performance, such as textile layers, mortar properties, and interface characteristics. Particular attention is given to the stress-transfer mechanism between fibres, mortar matrix, and the parent masonry material. Based on the experimental findings, the feasibility and effectiveness of flax-based TRM systems as a sustainable and compatible strengthening technique for masonry structures are also evaluated.

Keywords: Cold-Formed Steel; Shear Buckling; Web Opening; FE Modelling; Channel Section

Introduction

The high vulnerability of unreinforced masonry structures to lateral loading (such as wind loads and earthquakes) resulted in numerous losses of human life and property, manifesting the need for structural strengthening and/or seismic retrofitting. Textile-Reinforced Mortars (TRM), which are externally bonded composite systems comprising inorganic matrices (cement-, lime- or geopolymer-based mortars) reinforced with advanced fibre meshes, offer a series of structural benefits for strengthening applications, including: high specific strength and stiffness, vapour permeability, reversibility, recyclability, compatibility with masonry substrates, ability to conduct post-earthquake damage assessment (Tri-antafillou et al. 2006). Their potential in strengthening against both in-plane (Papanicolaou et al. 2015) and out-of-plane loading actions (Mordanova et al. 2016), as well as in the strengthening of vaults, arches, pillars, and lintels, has been highlighted through several case studies (Bournas 2016).

Despite the superior tensile properties of the reinforcement typically used in TRM systems (glass, carbon, aramid, PBO, steel cords), their performance is governed by the quality of the bond between the constituent materials, which often does not allow to fully exploit the fibre capacity. In parallel, these relatively high-cost fibres require a high energy input for their manufacturing and processing. The pressing need for sustainable development led to the exploration of alternative, eco-friendly reinforcing materials. Natural fibres have emerged as a potential solution for reinforcement in composites, given their excellent environmental credentials and wide availability around the world (Yan et al. 2016). Among natural fibres, flax has attracted the interest of both academia and industry due to its good specific tensile strength and stiffness, comparable to glass (Joshi et al. 2004), and deformability values suitable for strengthening applications.

However, the potential of flax-TRM (FTRM) as externally bonded systems has not yet been determined, and the mechanical properties and bond performance of such systems have not been examined in detail. Available research on the topic is still in its infancy (Olivito et al. 2014, Cevallos & Olivito 2015, Codispoti et al. 2015, Olivito et al. 2016, Olivito et al. 2018, Ferrara et al. 2019), while the complexity of the stress-transfer mechanism in already established TRM systems, which involves failure both at textile/mortar and composite/substrate interface (e.g. Alecci et al. 2016), has been well documented and is still under investigation. The complexity of the TRM bond performance is further increased when additional design parameters are taken into account, such as the number of the reinforcing layers or the textile layout, as they affect strength, failure mode and crack pattern (Misseri et al. 2019). As a result, there is a lack of in-depth understanding of the behaviour of FTRM, which in turn hinders their implementation in strengthening applications and their market acceptance.

This paper presents the preliminary results of a larger experimental programme on the bond between flax textile-reinforced lime-based mortars and unreinforced masonry prisms, with the aim of developing an effective and sustainable strengthening solution for masonry. Tensile and single-lap shear bond tests were performed on single and double-layer FTRM specimens to gain insight into the stress-transfer mechanism between fibres, matrix and parent material.

The methodology

Two types of flax textiles of different architectures (F1 and F2) were combined with the same lime-based mortar to develop sustainable composites suitable for the strengthening of masonry. The mechanical performance of the composite system was examined through:

-direct tensile tests on FTRM composites (coupons), according to AC434 provisions.

-single-lap shear bond tests on unreinforced masonry prisms, according to RILEM TC 250-CSM provisions.

The effect of the number of TRM layers on the overall performance was assessed by examining specimens comprising one and two reinforcement layers.

Each masonry prism consisted of four stack-bonded solid clay bricks of dimensions 215 x 102.5 x 65 mm and 10-mm thick mortar joints. The cement lime: sand proportions in the mortar used to bed the joints were 1:2:9, by volume, with a water-to-dry materials ratio of 0.21, by weight. The mechanical properties of the masonry substrate were experimentally determined by carrying out four compression tests perpendicular to the mortar joints, according to RILEM standards (RILEM LUMB1). The mean values of the compressive strength and elastic modulus at 28 days were found to be 30.5 MPa (CoV:2%) and 1970.5 MPa (CoV:5%), respectively.

Flax-TRM

Two types of flax textiles were investigated as reinforcement, distinguished by their geometry and physical properties. Both textiles were woven, with yarns being equally arranged in an orthogonal mesh. The textiles are shown in Figure 1, while their characteristics are summarized in Table 1.

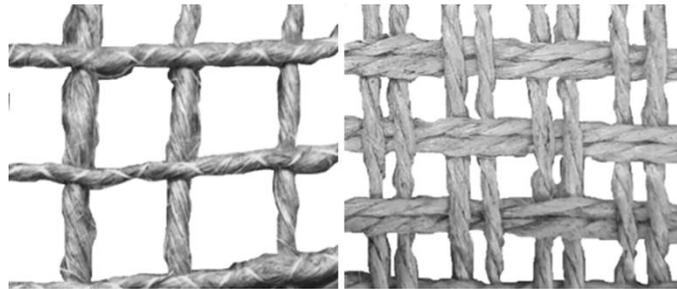


Figure 1. Textile characteristics, F1 (left) and F2 (right).

The textile mechanical properties were obtained from direct tensile tests according to EN ISO 13934:1999 (gauge length: 200 mm; grip method: epoxy-bonded aluminum tabs; loading rate: 2 mm/min; number of yarns width-wise: 3 for F1, 10 pairs for F2).

Both flax textiles were combined with a commercially available lime-based mortar, the strength of which was obtained through flexural testing on thirty-nine prisms measuring 160 x 40 x 40 mm and compression testing on the resulting halves, following EN 1015-11. The flexural and compressive strengths were 2.8 MPa and 7.7 MPa, respectively, with a CoV value of 15%.

All FTRM composites (both for tensile and shear bond tests) were prepared by applying a bottom 3-mm thick mortar layer, manually embedding the textile into the fresh mortar, and covering with a top mortar layer of the same thickness. The procedure was repeated for the specimens with two TRM layers, resulting in a total thickness of 9 mm.

For the direct tensile tests, FTRM coupons measured 600 x 50 mm and were cast in plexiglass formwork (6 replicates per configuration). Specimens were cured in a mist room for 28 days and then stored in standard laboratory conditions until testing. Width-wise, F1-TRM and F2-TRM specimens comprised 3 and 20 yarns, respectively.

For the shear bond tests, FTRM were centrally bonded across the width of the masonry prisms and 30 mm away from their front face to avoid stress concentration phenomena. A bonded area

100 mm wide and 260 mm long (3 replicates per configuration) was provided to ensure effective anchorage of the composite to the substrate (RILEM TC 250-CSM). The unbonded textile (i.e., the length of the textile projecting from the bonded area) measured 600 mm to mitigate any misalignment during testing. The specimens were cured under wet hessian cloth for 28 days and then stored in standard laboratory conditions until testing. Width-wise, F1-TRM and F2-TRM specimens comprised 7 and 40 yarns, respectively.

Table 1. Textile characteristics.

Property	F1	F2
Mesh size (mm) ^a	14	4
Yarn cross-sectional area (mm ²) ^a	1.11	0.22 ^b
Tensile Strength (MPa)	196.4	289.0
Elastic Modulus (GPa)	7.1	13.6
Strain at failure (%)	4.2	3.8

^a supplied by the manufacturer; ^b the value refers to a single yarn

A random speckle pattern was applied manually to the surface of the specimens (both coupons and masonry prisms) to enable the use of digital image correlation (DIC) and obtain full-field displacement measurements. DIC results will be presented in future publications.

Experimental Setups

To ensure a uniform stress distribution during testing, the ends of the FTRM coupons and the unbonded textile in the shear bond specimens were epoxy-bonded to aluminum tabs (150 mm long).

Direct tensile tests were performed in a universal testing machine of 10 kN capacity, in displacement control at a loading rate of 0.2 mm/min up to the occurrence of the first crack and 1 mm/min thereafter. Clevis-type grips were used, allowing for in-plane rotation of the specimens while being loaded (Fig. 2a). The specimens' ID has the form of FxLy-n, where F and L stand for Flax and Layer, respectively, x is the type of the flax textile (1 or 2 - see Fig. 1), y is the number of TRM layers (1 or 2) and n the replicate number.

Shear bond tests were performed in a servohydraulic testing machine fitted with a 50 kN load cell, in displacement control at a loading rate of 0.5 mm/min. Single-lap shear tests were performed, with the masonry prisms horizontally restrained within a rigid steel frame (Fig. 2b). A pre-tension load of 100 N was applied prior to installing the instrumentation. Four linear displacement transducers (potentiometers) of 10 mm stroke were attached on the shear bond specimens to measure the displacement relative to a thin aluminum plate glued on the textile adjacent to the loaded end: two on the substrate, on either side of the bonded area, to measure the slip between the textile and the substrate; two on either side of the bonded width, to measure the slip between the textile and the composite and derive the overall slip between the composite and the substrate (Fig. 2c). The ID of the bond specimens has the form of FxLy-260-100-n, where 260 stands for the bond length (mm) and 100 for the bond width (mm), and the rest of the notation is

the same as used for the TRM coupons.

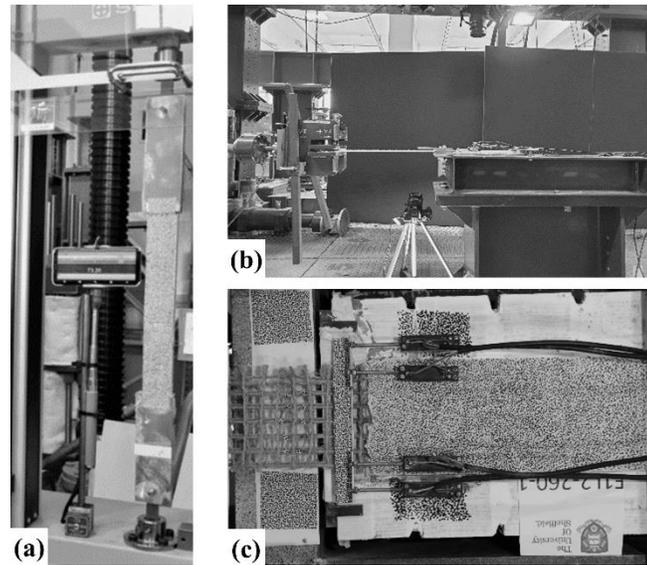


Figure 2. Experimental test setups: (a) tensile tests on FTRM coupons; (b) shear bond tests (side view); (c) shear bond tests (plan view) and arrangement of the potentiometers.

Findings/Discussion

Table 2 presents the average tensile properties of the TRM coupons (and the corresponding CoV values in parentheses) reinforced with one and two layers of the corresponding flax textiles. It can be observed that F2-TRM specimens exhibited superior mechanical properties compared to those of their F1 counterparts. The addition of an FTRM layer, however, did not increase the mechanical properties significantly.

Figure 3 shows the tensile stress-strain response curves of typical specimens grouped per flax textile type. The typical three stages that characterize the tensile behaviour of TRM systems, i.e., pre-cracked, crack development and post-cracking stage (Arboleda et al. 2016), did not always develop in the tested composites. The uncracked stage was not detectable in most of the F1L1-TRM specimens due to pre-existing microcracks formed during curing and positioning of the specimens in the testing machine. In addition, half of the F1L1-TRM specimens were characterized by the formation of one single crack with no crack development stage, while two to three cracks occurred in the remaining specimens. A telescopic failure was observed in the proximity of the cracks in all specimens, as a result of the relative slip of the inner yarn filaments. On the contrary, F2L1-TRM specimens were characterized by the formation of multiple cracks along the composite, which also provided evidence of the good bond between the textile and the mortar, resulting in a greater contribution of the matrix to the overall performance. No delamination or slippage of the reinforcement in the gripping areas were observed in any of the tested specimens. The end of the crack development stage was not always distinguishable from the post-cracking stage, with failure immediately following the formation of the last crack and initiating a softening stage triggered by the progressive tensile rupture of the yarns. This progressive failure mechanism led to the development of higher elongation capacity of the F2-TRM systems with respect to that of the bare F2 textiles.

The failure mode between the two FTRM systems did not change when an additional TRM layer was provided (telescopic failure in F1-TRM, tensile rupture in F2-TRM). However, double-layer FTRM exhibited higher ductility, developed a greater number of cracks and distinct stages of crack initiation and development.

The different textile geometry and reinforcement ratio, i.e. textile/composite cross-sectional area (Table 2), played a key role in the differentiation between the Flax-TRM systems' tensile behaviour: the large yarn cross-sectional area in F1 textiles (Table 1) may have resulted in increased moisture absorption inducing pre-existing cracks, and in a telescopic mode of failure due to uneven impregnation of all filaments, while the denser and of smaller yarn diameter F2 textile benefitted from an increased mechanical interlock with the matrix. On the other hand, the reinforcement ratio provided in F1L1-TRM composites (1.11%) was insufficient to create an effective composite system (poor stress redistribution, no appreciable increase in strength over the strength of the matrix).

Table 2. Tensile test results.

Specimen ID	Tensile strength (MPa)	Elastic modulus* (GPa)	Strain at peak load (%)	Reinforcement ratio (%)
F1L1	82.2 (15%)	2.02 (15%)	4.1 (22%)	1.11
F1L2	83.0 (11%)	2.13 (13%)	4.4 (11%)	1.48
F2L1	177.8 (12%)	2.98 (9%)	7.3 (14%)	1.44
F2L2	208.9 (8%)	3.87 (9%)	7.9 (8%)	1.92

*during cracked stage.

Shear Bond Tests

Table 3 summarizes the experimental results from bond tests in terms of i) maximum applied load, ii) maximum axial stress (load divided by the textile cross-sectional area), and iii) slip at maximum load (calculated as the average of the two transducers' measurements placed on the composite, subtracting the elastic elongation of the unbonded textile). A uniform stress distribution across the composite width and between the multiple TRM layers was assumed when determining stress values. Bond and tensile capacities were of the same order of magnitude only when the same failure mode was observed in both test series, as analysed below. The bond test

results were affected by a higher scatter than those obtained from the composites' tensile testing due to the development of different failure modes and the complex nature of the interaction between the multiple fibres/matrix interfaces. Hence, no average values are presented for identical specimens.

Table 3. Shear bond test results.

Specimen ID	Maximum load (N)	Maximum axial stress (MPa)	Slip at maximum load (mm)
F1L1-260-100-1	268	34.4	1.30
F1L1-260-100-2	360	46.3	3.86
F1L1-260-100-3*	204	26.3	1.66
F1L2-260-100-1*	583	37.5	8.24
F1L2-260-100-2	1607	103.3	4.65
F1L2-260-100-3	1030	66.2	2.36
F2L1-260-100-1	1728	200.1	6.86
F2L1-260-100-2	1193	138.1	5.98
F2L1-260-100-3	1870	216.4	9.96
F2L2-260-100-1	2753	159.3	5.87
F2L2-260-100-2	3183	184.2	7.59
F2L2-260-100-3*	1573	91.0	3.81

*different failure mode within the tested group.

The axial stress-slip relationship of all tested systems is illustrated in Figure 4, where a variety of bond performances can be observed.

The response of most F1-TRM systems exhibited an almost linear response up to the attainment of the peak stress and a post-peak softening stage, during which failure occurred progressively and was associated with an increase of slip. Specimens failed after the initiation of relative slip of the inner filaments, similarly to the behaviour obtained from direct tensile tests on composites, which was often followed by the progressive failure of individual filaments outside the bonded area, similarly to the behaviour obtained from direct tensile tests on the dry textiles. No cracking of the mortar along the bonded area occurred and no relative displacement of the top mortar layer and the substrate was recorded. Specimens F1L1-260-100-3 and F1L2-260-100-1 exhibited a different behaviour caused by a more pronounced telescopic failure mode, which resulted in reduced axial stress and increased deformation (see Table 3). The effect of non-uniform engagement of the yarn filaments within the mortar, which acts as mechanical anchorage,

triggered the slip between the yarns' filaments and resulted in higher total relative textile-to-mortar displacement and a pseudo-ductile behaviour.

F2-TRM systems developed one crack in single-reinforced specimens and one or multiple cracks in double-reinforced specimens, that widened significantly during the test. The cracks initiated as parallel to the applied load, through the thickness of the composite, and then expanded transversally to the load axis application, close to the loaded end. The peak stress was determined by the rupture of some of the F2 yarns not only in the unbonded textile but also along the bonded area and across the crack. All specimens failed due to the partial detachment of the textile from the bottom mortar layer in F2L1 series and at the two textile/mortar interfaces in F2L2 series (Fig. 5a), with the bottom mortar layer remaining always well bonded to the brick surface, indicating that the employed bond length (260 mm) was indeed sufficient. Especially for the latter series, detachment may have been facilitated by the unavoidable misalignment between the actuator and the FTRM system. As a result, along with the cracking and redistribution of stresses after the failure in one textile layer, additional bending might have been induced causing the separation of the textile from the mortar. Complete detachment of the top mortar layer was observed in specimen F2L2-260-100-3, which significantly moved with respect to the masonry support, as evidenced by the large slip values (Fig. 5b) at the composite/substrate interface (determined as the difference between the displacement measured by the potentiometers mounted on the substrate and those mounted on the composite).

Figure 6 shows the exploitation ratio of the textile, expressed by the factors η_t and η_{TRM} . The former equals to the ratio of the maximum axial stress developed during the bond test to the tensile strength of the associated textile (see Table 1); the latter equals to the ratio of the maximum axial stress to the tensile strength of the associated FTRM coupon (see Table 2). Average values are shown in this figure and were computed by excluding the specimens within the same group that exhibited a different failure mode. Overall, η_t was significantly lower than η_{TRM} , highlighting a possible degree of fibre degradation when embedded in mortar. Comparing the two FTRM systems, it can be observed that F2 textiles were likely less affected by the lime-based mortar, with both η_t and η_{TRM} values higher than those of F1-TRM.

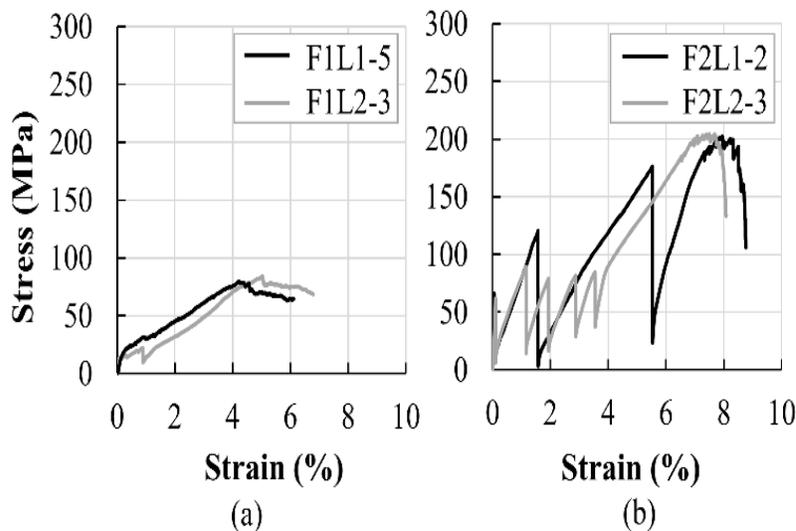


Figure 3. Tensile stress-strain response for typical single- and double-layer coupons: (a) F1-TRM and (b) F2-TRM.

Although η_t values were between 60-65% for F2-TRM systems, failure of the bond specimens occurred due to fibre tensile rupture, while all F1-TRM systems were characterized by a telescopic mode of failure, justifying values of η_t lower than 40%.

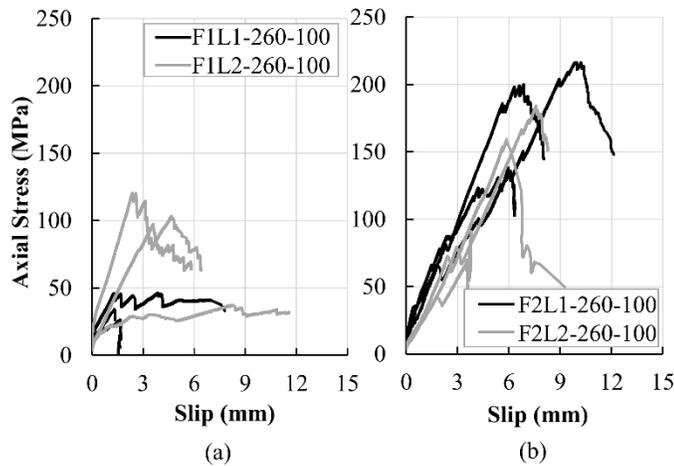


Figure 4. Axial stress-slip curves for single- and double-layer TRM-strengthened masonry prisms: (a) F1-TRM; (b) F2-TRM.

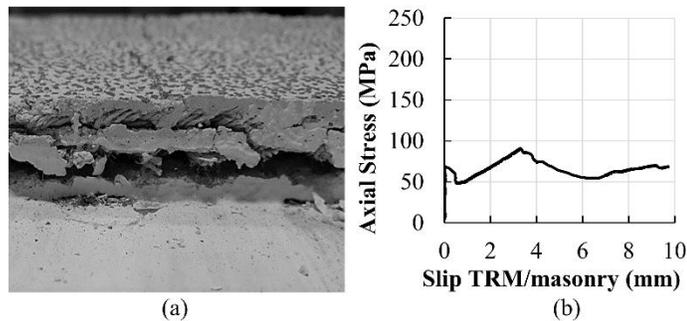


Figure 5. (a) Typical failure mode of F2-TRM bond series (side view); (b) slip of TRM to masonry for specimen F2L2-260-100-3.

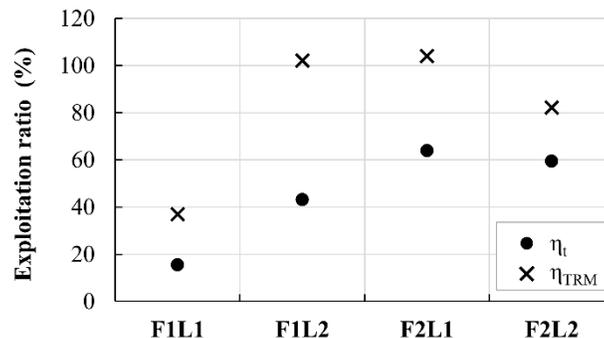


Figure 6. Exploitation ratio of the textile during the shear bond tests.

Strength values similar to those obtained for coupons under direct tension were obtained for double-layer F1-TRM ($\eta_{TRM} = 102\%$) and single-layer F2-TRM specimens ($\eta_{TRM} = 104\%$), indicating a good bond between the fibres and the mortar. The very low exploitation of F1 composites in the

case of single-layer TRM systems ($\eta_{\text{TRM}} = 37\%$) confirmed the poor fibre/mortar interaction, which was also observed in direct tensile tests on corresponding coupons. The aforementioned observations provide information for the design of the most suitable strengthening solution according to the required structural application. Provided a good fibre/matrix interaction can be achieved (e.g., F2-TRM), although the addition of an FTRM layer will not result in an increase in tensile strength, this will lead to an increase in ductility, which could be desirable in some structural applications, e.g., in-plane shear strengthening of masonry walls.

Conclusion

This study presents the preliminary results of direct tensile and shear bond tests of TRM/masonry systems reinforced with one and two layers of two different flax textiles.

Both Flax-TRM systems developed high tensile strength (80 to 200 MPa) and elongation capacity (4 to 8%).

The failure modes included telescopic failure in flax textiles with thick yarns at a large spacing (F1) and tensile fibre rupture in textiles with thin and twisted yarns at a smaller spacing (F2). Partial or full detachment between the textiles and the mortar occurred only in the latter systems when bonded to the masonry.

Overall, textiles of denser and smaller yarn cross-sectional area are more suitable for strengthening applications as they result in composites of higher ductility, with good interaction at the textile/mortar interface, evidenced by multiple cracking.

The increase in the number of FTRM layers results in a more ductile behaviour without affecting the overall mechanical performance significantly.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors wish to thank Vimark S.r.L for providing the lime-based mortar.

References

1. Arboleda, D., Carozzi, F.G., Nanni, A. & Poggi, C. 2016. Testing Procedures for the Uniaxial Tensile Characterization of Fabric-Reinforced Cementitious Matrix Composites. *Journal of Composites for Construction* 20(3): 1-13.
2. Alecci, V., De Stefano, M., Luciano, R., Rovero, L. & Stipo, G. 2016. Experimental Investigation on Bond Behavior of Cement-Matrix-Based Composites for Strengthening of Masonry Structures. *Journal of Composites for Construction* 20(1): 1-10.
3. Bournas, D. 2016. Strengthening of existing structures: Selected case studies. In T. C. Triantafillou (ed.), *Textile fibre composites in civil engineering*: 389-411. Cambridge: Woodhead Publishing.
4. Cevallos, O. A. & Olivito, R. S. 2014. Effects of fabric parameters on the tensile behaviour of sustainable cementitious composites. *Composites Part B: Engineering* 69: 256-266.
5. Ferrara, G., Coppola, B., Di Maio, L., Incarnato, L. & Martinelli, E. 2019. Tensile strength of flax fabrics to be used as reinforcement in cement-based composites: experimental tests under different environmental exposures. *Composites Part B: Engineering* 168: 511-23.
6. De Felice, G., Aiello, M.A., Caggegi, C., Ceroni, F., De Santis, S., Garbin, E., Gattesco, N., Hojdys, Ł., Krajewski, P., Kwiecień, A., Leone, M., Lignola, G.P., Mazzotti, C., Oliveira, D., Papanicolaou, C., Poggi, C., Triantafillou, T., Valluzzi, M.R. & Viskovic, A. 2018. Recommendation of RILEM Technical Committee 250-CSM: Test method for Textile Reinforced Mortar to substrate

- bond characterization. *Materials and Structures*, 51: 495.
7. Joshi, S.V., Drzal, L.T., Mohanty, A.K. & Arora, S. 2004. Are natural fiber composites environmentally superior to glass fiber reinforced composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 35(3): 371-376.
 8. Mordanova, A., De Santis, S. & de Felice, G. 2016. State-of-the-art review of out-of-plane strengthening of masonry walls with mortar-based composites. In Van Balen and Verstrynghe (eds.), *Structural Analysis of Historical Constructions – Anamnesis, diagnosis, therapy, controls*: 337-343. London: Taylor and Francis Group.
 9. Olivito, R.S., Cevallos, O.A. & Carrozzini, A. 2014. Development of durable cementitious composites using sisal and flax fabrics for reinforcement of masonry structures. *Materials and Design* 57: 258-268.
 10. Olivito, R.S., Codispoti, R. & Cevallos, O.A. 2016. Bond behavior of Flax-FRCM and PBO-FRCM composites applied on clay bricks: Experimental and theoretical study. *Composite Structures* 146: 221-231.
 11. Olivito, R.S., Codispoti, R., Scuro, C. & Porzio S. 2018. Experimental evaluation of the adhesion of a FRCM-tuff strengthening system. *Procedia Structural Integrity* 12: 594-601.
 12. Papanicolaou, C.G., Triantafillou, T.C. & Fabregat, P.R. 2015. Increase of load-carrying capacity of masonry with textile reinforced rendering / Erhöhung der Tragfähigkeit von Mauerwerk mit textildbewehrtem Putz. *Mauerwerk* 19(1): 40-51.
 13. Triantafillou T.C., Papanicolaou, C.G., Zissimopoulos, P. & Laourdekis, T. 2006. Concrete Confinement with Textile-Reinforced Mortar Jackets. *ACI Structural Journal* 103(1): 28-37.
 14. Yan, L., Kasal, B. & Huang, L. 2016. A review of recent research on the use of cellulosic fibres, their fibre fabric reinforced cementitious, geo-polymer and polymer composites in civil engineering. *Composites Part B: Engineering* 92: 94-132.
 15. AC434 ICC-ES 2013. *Masonry and Concrete Strengthening Using Fiber-Reinforced Cementitious Matrix (FRCM) Composite Systems*. Whittier: ICC-Evaluation Service.
 16. EN 1015-11:1999. *Methods of test for mortar for masonry - Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar*. London: BSI.
 17. EN ISO 13934-1:2013. *Textiles-Tensile Properties of Fabrics-Part 1: Determination of Maximum Force and Elongation at Maximum Force Using the Strip Method*. Brussels: BSI.
 18. RILEM TC-76 1999. *Technical Recommendations for Testing and Use of Constructions Materials: LUMB1-Compressive Strength of Small Walls and Prisms*. London: Chapman & Hall.

Н. Трохутсу, К. Пилакутас, М. Гуаданьини

Шеффилд Университеті, Шеффилд, Ұлыбритания

Flax-TRM жүйелерінің созылу және жаншу-срез адгезиялық сынақтары

Аңдатпа. Бұл мақала табиғи талшықтарға негізделген TRM композиттері мен қалау негізі (тас, кірпіш) арасындағы адгезиялық өзара әрекеттесуін зерттеуге арналған эксперименттік бағдарламаның алдын ала нәтижелерін ұсынады. TRM жүйесі әк негізді ерітіндіге енгізілген бір немесе екі қабат зығыр талшықты текстильден құралады. «Текстиль/матрица» композиттерінің жұмыс істеу қабілеті және олардың қалау негізімен

адгезиялық байланысы тікелей созылу сынақтары мен біржақты жаншу-срез адгезиялық сынақтары арқылы зерттелді. Екі серияның нәтижелері талқыланып, күшейту жүйелерін жобалауға қажетті негізгі параметрлер анықталды. Талшықтар, матрица және негіз материал арасындағы кернеуді беру механизмі жан-жақты қарастырылып, Flax-TRM жүйелерін қалау құрылымдарын күшейту шешімі ретінде қолдану мүмкіндігі бағаланды.

Түйін сөздер: суықтай иілген болат (Cold-Formed Steel); жаншу тұрақсыздығы (Shear Buckling); қабырға ойығы (Web Opening); соңғы-элементтік модельдеу (FE Modelling); арна тектес қима (Channel Section).

Н. Трохутсу, К. Пилакутас, М. Гуаданьини

Университет Шеффилда, Шеффилд, Великобритания

Испытания на растяжение и сдвиг на системах Flain-TRM

Аннотация. Данная статья представляет предварительные результаты экспериментальной программы, посвящённой исследованию адгезионного поведения между композитами TRM на основе природных волокон и каменной кладкой. Система TRM состояла из одного и двух слоёв льняных текстилей, внедрённых в известковый раствор. Характеристики композитов «текстиль/матрица» и их адгезионное взаимодействие с основанием из кладки были изучены с помощью прямых растягивающих испытаний и однонаправленных сдвиговых адгезионных испытаний. Обсуждаются результаты обеих серий испытаний, а также определяются ключевые параметры для проектирования усиления конструкций. Подробно рассматривается механизм передачи напряжений между волокнами, матрицей и основным материалом, а также оценивается возможность применения систем Flax-TRM в качестве решения для усиления каменной кладки.

Ключевые слова: холодногнутая сталь (Cold-Formed Steel); сдвиговая потеря устойчивости (Shear Buckling); отверстия в стенке профиля (Web Opening); конечно-элементное моделирование (FE Modelling); швеллерные профили (Channel Section)

References

1. Arboleda, D., Carozzi, F.G., Nanni, A. & Poggi, C. 2016. Testing Procedures for the Uniaxial Tensile Characterization of Fabric-Reinforced Cementitious Matrix Composites. *Journal of Composites for Construction* 20(3): 1-13.
2. Alecci, V., De Stefano, M., Luciano, R., Rovero, L. & Stipo, G. 2016. Experimental Investigation on Bond Behavior of Cement-Matrix-Based Composites for Strengthening of Masonry Structures. *Journal of Composites for Construction* 20(1): 1-10.
3. Bournas, D. 2016. Strengthening of existing structures: Selected case studies. In T. C. Triantafillou (ed.), *Textile fibre composites in civil engineering*: 389-411. Cambridge: Woodhead Publishing.
4. Cevallos, O. A. & Olivito, R. S. 2014. Effects of fabric parameters on the tensile behaviour of sustainable cementitious composites. *Composites Part B: Engineering* 69: 256-266.
5. Ferrara, G., Coppola, B., Di Maio, L., Incarnato, L. & Martinelli, E. 2019. Tensile strength of flax fabrics to be used as reinforcement in cement-based composites: experimental tests

- under different environmental exposures. *Composites Part B: Engineering* 168: 511-23.
6. De Felice, G., Aiello, M.A., Caggegi, C., Ceroni, F., De Santis, S., Garbin, E., Gattesco, N., Hojdys, Ł., Krajewski, P., Kwiecień, A., Leone, M., Lignola, G.P., Mazzotti, C., Oliveira, D., Papanicolaou, C., Poggi, C., Triantafillou, T., Valluzzi, M.R. & Viskovic, A. 2018. Recommendation of RILEM Technical Committee 250-CSM: Test method for Textile Reinforced Mortar to substrate bond characterization. *Materials and Structures*, 51: 495.
 7. Joshi, S.V., Drzal, L.T., Mohanty, A.K. & Arora, S. 2004. Are natural fiber composites environmentally superior to glass fiber reinforced composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 35(3): 371-376.
 8. Mordanova, A., De Santis, S. & de Felice, G. 2016. State-of-the-art review of out-of-plane strengthening of masonry walls with mortar-based composites. In Van Balen and Verstrynghe (eds.), *Structural Analysis of Historical Constructions – Anamnesis, diagnosis, therapy, controls*: 337-343. London: Taylor and Francis Group.
 9. Olivito, R.S., Cevallos, O.A. & Carrozzini, A. 2014. Development of durable cementitious composites using sisal and flax fabrics for reinforcement of masonry structures. *Materials and Design* 57: 258-268.
 10. Olivito, R.S., Codispoti, R. & Cevallos, O.A. 2016. Bond behavior of Flax-FRCM and PBO-FRCM composites applied on clay bricks: Experimental and theoretical study. *Composite Structures* 146: 221-231.
 11. Olivito, R.S., Codispoti, R., Scuro, C. & Porzio S. 2018. Experimental evaluation of the adhesion of a FRCM-tuff strengthening system. *Procedia Structural Integrity* 12: 594-601.
 12. Papanicolaou, C.G., Triantafillou, T.C. & Fabregat, P.R. 2015. Increase of load-carrying capacity of masonry with textile reinforced rendering / Erhöhung der Tragfähigkeit von Mauerwerk mit textildbewehrtem Putz. *Mauerwerk* 19(1): 40-51.
 13. Triantafillou T.C., Papanicolaou, C.G., Zissimopoulos, P. & Laourdekis, T. 2006. Concrete Confinement with Textile-Reinforced Mortar Jackets. *ACI Structural Journal* 103(1): 28-37.
 14. Yan, L., Kasal, B. & Huang, L. 2016. A review of recent research on the use of cellulosic fibres, their fibre fabric reinforced cementitious, geo-polymer and polymer composites in civil engineering. *Composites Part B: Engineering* 92: 94-132.
 15. AC434 ICC-ES 2013. *Masonry and Concrete Strengthening Using Fiber-Reinforced Cementitious Matrix (FRCM) Composite Systems*. Whittier: ICC-Evaluation Service.
 16. EN 1015-11:1999. *Methods of test for mortar for masonry - Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar*. London: BSI.
 17. EN ISO 13934-1:2013. *Textiles-Tensile Properties of Fabrics-Part 1: Determination of Maximum Force and Elongation at Maximum Force Using the Strip Method*. Brussels: BSI.
 18. RILEM TC-76 1999. *Technical Recommendations for Testing and Use of Constructions Materials: LUMB1-Compressive Strength of Small Walls and Prisms*. London: Chapman & Hall.

Information about the authors:

N. Trochoutsou- Dr. Department of Civil and Structural Engineering, The University of Sheffield: Sheffield, GB

K. Pilakoutas-Professor, Department of Civil and Structural Engineering, The University of Sheffield: Sheffield, GB

M. Guadagnini- Senior lecturer Civil and Structural Engineering, The University of Sheffield: Sheffield, GB

Н. Трохутсу-техника ғылымдарының докторы, Азаматтық құрылыс факультеті, Шеффилд университеті, Ұлыбритания

К. Пилакутас-профессор, Азаматтық құрылыс факультеті, Шеффилд университеті, Ұлыбритания

М. Гуаданини-аға оқытушы, Азаматтық құрылыс факультеті, Шеффилд университеті, Шеффилд, Ұлыбритания

Н. Трохутсу - доктор технических наук, факультет гражданского строительства, Университет Шеффилда, Великобритания

К. Пилакутас - профессор, факультет гражданского строительства, Университет Шеффилда, Великобритания

М. Гуаданьини - старший преподаватель, факультет гражданского строительства, Университет Шеффилда, Шеффилд, Великобритания



Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).



IRSTI 67.15.63

<https://doi.org/10.32523/2616-7263-2026-154-1-23-34>

Article

Calculation of model stresses from a motor vehicle wheel on the contact patch, depending on tire pressure

L.T. Kabdyrova*¹ , R.E. Lukpanov¹ , F.B. Abdushkurov² ,
M. Karacasu³ 

¹L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan

² Technobius, LLP, Astana, Kazakhstan

³Eskisehir Technical University, Eskisehir, Turkey

E mail: ¹leila_0781@mail.ru, ²lukpanov_rye@enu.kz, ³farit.afb@mail.ru,
⁴muratk@ogu.edu.tr

Abstract. This article presents part of a model study on the abrasion resistance of an anti-icing agent impregnation composition, related to the calculation and modeling of stresses transmitted by a model wheel to a concrete road, taking into account actual indicators and scaling. The aim of the research was to assess the normal stresses arising from the impact of motor vehicles, taking into account the variability of the contact patch resulting from a decrease or increase in tire pressure. Calculations were performed for different types of vehicles, from bicycles to trucks, which were conditionally divided into categories A1-A5 (in ascending order of vehicle weight). The calculation results are presented as ranges of normal stresses on the road surface caused by the operation of motor vehicles, depending on their type and standard load capacity. The calculations were performed using the linear graph method of universal tire characteristics, taking into account normal deflection and variable potential pressure in the tire. The obtained calculation results will allow for more accurate development of calculation schemes in numerical or large-scale modeling of road situations.

Keywords: abrasion, contact patch, icing, modeling, road surface, tension, pressure.

Introduction.

Road construction plays a key role in the economic development of any country, ensuring territorial connectivity, mobility of the population, and the stable functioning of logistics systems. The quality and durability of road infrastructure directly affect transportation efficiency, safety indicators, and long-term maintenance costs. In modern road construction practice, particular attention is paid not only to structural strength but also to operational reliability under varying climatic conditions. The emphasis is on creating safe and comfortable traffic conditions while ensuring the long service life of pavement structures with minimal repair interventions. Technologies for constructing cement concrete and asphalt concrete pavements are widely used in the modern road industry [1]. The selection of pavement type depends on traffic intensity, climatic factors, economic considerations, and lifecycle performance requirements. Cement concrete roads possess a number of significant advantages compared to asphalt concrete pavements, including extended service life, high compressive strength, resistance to rutting, and improved performance under repeated freeze–thaw cycles [2]. Their structural rigidity allows for more uniform load distribution, which is especially important under heavy traffic conditions. In addition, cement concrete pavements demonstrate relatively stable mechanical characteristics at elevated summer temperatures, where asphalt pavements may experience softening and deformation. Despite these advantages, cement concrete pavements also have certain limitations. One of the most critical issues in cold regions is the formation of ice on the road surface at low temperatures, which significantly reduces skid resistance and poses a serious threat to traffic safety [3]. The relatively smooth surface texture of concrete and its hydrophilic nature contribute to water retention and subsequent icing under freeze–thaw conditions. In regions with prolonged winter periods, this problem becomes particularly acute. Although accident statistics during winter months do not always show a dramatic increase in the total number of road accidents compared to other seasons, the nature and causes of accidents differ substantially. In warmer periods, road accidents are typically associated with driver behavior, vehicle condition, or traffic density. In winter, however, an additional and often decisive risk factor emerges — icing of the pavement surface [4]. Even at minimum permissible speeds, vehicles may lose traction due to reduced adhesion between tires and the icy surface. Sudden skidding and loss of vehicle control can occur even under seemingly stable driving conditions. Therefore, preventive measures aimed at reducing ice formation and ice adhesion to the pavement are of considerable practical importance. Currently, the most widespread approach is the chemical method, which involves treating road surfaces with solid or liquid reagents that lower the freezing point of water and prevent ice formation. Combined methods, such as sand–salt mixtures, are also widely used. However, chemical reagents may accelerate pavement degradation, contribute to reinforcement corrosion, and negatively affect the environment [5]. The structural method focuses on modifying the surface layer of the pavement itself by introducing materials or coatings with inherent anti-icing properties. Although this approach can provide longer-term performance, it typically increases construction costs and requires careful technological implementation. Given these limitations, the development of effective and economically justified methods for protecting cement concrete pavements from icing remains a relevant research problem. A promising direction is the use of surface impregnations that do not require frequent reapplication and are capable of significantly reducing, or potentially eliminating, ice formation and adhesion [6]. In addition to technical performance, economic feasibility and ease of application are important criteria for practical implementation [7].

The ice-repellent impregnation composition proposed in this study is designed to reduce the adhesive resistance between ice and concrete surfaces. The bond strength between ice and concrete results from the combined action of two primary mechanisms: physicochemical adhesion at the material interface and mechanical interlocking of ice within the pore structure (micro- and macro-roughness) of the concrete surface. These mechanisms act synergistically, leading to a substantial increase in overall adhesive resistance. Therefore, reducing or eliminating one of the key components, namely interfacial adhesion, can significantly weaken the total bond strength of the ice crust. The proposed protective layer consists of an aqueous solution containing water-soluble polymer components. The use of a water-based system enables effective interaction with the hydrophilic surface of concrete. Due to capillary absorption, the solution penetrates into the near-surface pore structure, transporting the dissolved polymer components into the concrete matrix. As a result, the polymers migrate into the surface layer and partially coat the pore walls, forming a modified interfacial zone. This zone creates a stress-discontinuity layer that prevents ice and concrete from forming a rigid monolithic bond. Consequently, the ice layer can be detached under relatively small mechanical impact. However, the effectiveness of the impregnating composition depends on the depth and uniformity of polymer penetration into the concrete surface layer. These parameters are directly influenced by the concentration of components in the solution, viscosity, and absorption characteristics of the concrete. Therefore, determining the optimal concentration of the polymer components represents a key objective of the present study. The technological application process involves spraying the impregnating solution onto the pavement surface, forming a protective layer with ice-repellent properties.

Thus, the research is aimed at substantiating the effectiveness of a polymer-based impregnation capable of reducing ice adhesion to cement concrete pavements while maintaining practical applicability and economic feasibility.

The methodology

The methodology of the technological process for producing the anti-icing composition is shown in Figure 1. The polymer component is expected to be a colloidal dispersed polymer in combination with a keratin-containing component. Acrylic latex is proposed to be used as the colloidal polymer, and keratin-containing products will be manufactured from agricultural industry waste.

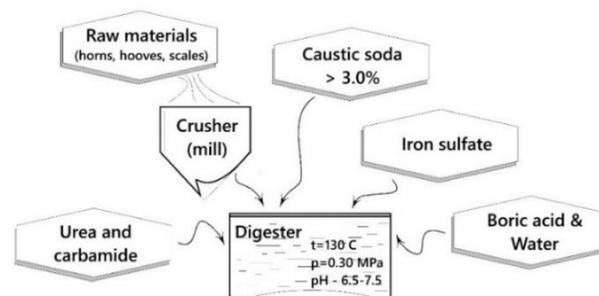


Figure 1. Technological diagram of additive production

The keratin-containing raw materials required for the production of ice-repellent coatings are of animal origin and include animal wool, hair, horns, hooves, and others. Before production begins, the keratin-containing components are prepared, precisely crushed and ground. Next, the raw materials are loaded into a boiling kettle with a weak concentration of boric acid in water (the ratio of water to raw materials is 1:3 by weight). At the same time, a mixture of urea in water is added (the water ratio is 2:3 by weight to the raw material). After the hydrolysis process at a temperature of 1300 °C for up to 10 hours, a pH acidity neutralizer, represented by iron sulfate, is added to the cooled mass.

To simulate the stresses transmitted by motor vehicles to cement concrete road surfaces, calculations were made for the wheel contact patch at its minimum and maximum standard loads. The stress calculations were necessary for subsequent large-scale tests based on the actual stress transmitted from the vehicle wheel to the concrete road surface. Motor vehicles were conditionally divided into five categories according to their load capacity, the characteristics of which are presented in Table 1, [10-14].

Table 1. Categories of motor vehicles

Category	GOST	Type of vehicle	Maximum permissible load, kN			
			single		double	
			Min	Max	Min	Max
A1	GOST 4750	bicycles	4.2	14.2	-	-
A2	GOST 5652	motorcycles, motor tricycles, motor scooters, and mopeds	2.6	5.7	-	-
A3	GOST 52900	passenger cars and trailers	0.98	3.29	-	-
A4	GOST 4754	light trucks and buses with particularly low capacity	0.29	0.85	-	-
A5	GOST 5513	trucks and buses	13.34	50.52	12.26	35.80

The contour area of the contact spot is calculated using the formula for the area of an ellipse, [13]:

$$F_{k_i} = \frac{\pi}{4} a_{k_i} b_{k_i} \quad (1)$$

where a_{k_i} and b_{k_i} — are the length and width of the contact patch of the tire tread with a flat, rigid surface, m.

The dimensions of the tire tread contact patch using universal tire characteristics parameters are proposed to be calculated using the following formulas:

$$a_{k_i} = \frac{20,5}{11,9 + \left| \frac{D}{B} - \frac{|n-9|}{2} - 3 \right|} \cdot \sqrt{D} \cdot f_{\text{ш}_i} - f_{\text{ш}_i}^2 \quad (2)$$

$$b_{k_i} = 2 \sqrt{2 \frac{B+H}{2.5} \cdot f_{\text{ш}_i} - f_{\text{ш}_i}^2} \quad (3)$$

where D — is the outer diameter of the tire;

B — tire profile width, m;

$H = (D - d)/2$ — tire profile height, m;

d — nominal rim diameter, m;

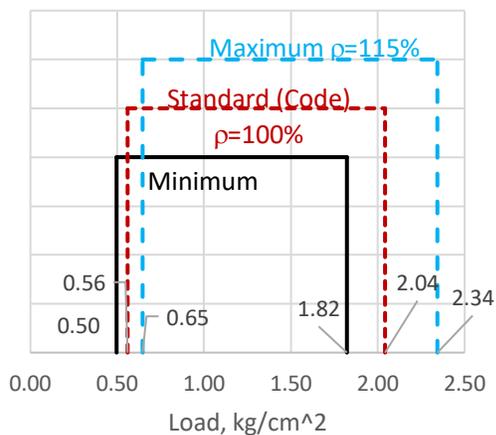
The dimensions of tires D , B , and the layer ratio n are given in table A.1 of GOST 7463 2003 [14], and the value $[f_{\text{ш}}]$ can be approximately determined using the known formula:

$$[f_{\text{ш}}] \approx D/2 - r_{\text{ст}} \quad (4)$$

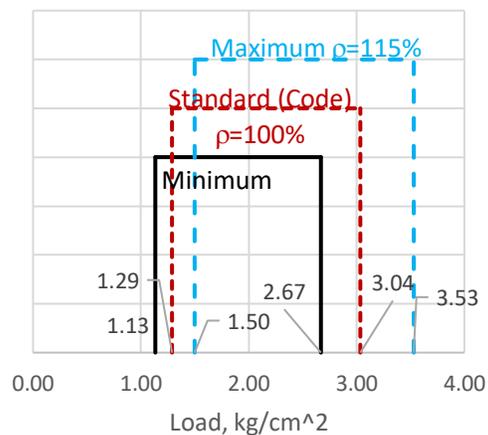
where $r_{\text{ст}}$ — static radius.

Findings/Discussion.

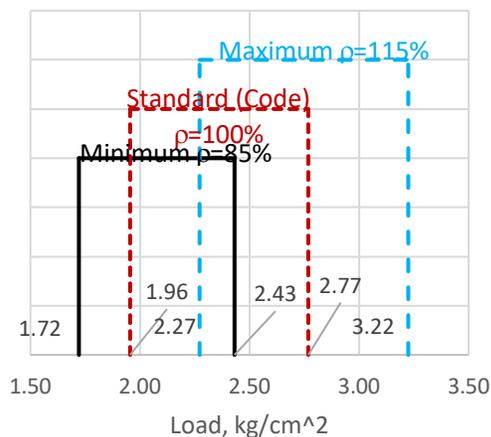
Figure 2 shows calculations of stresses transmitted from motor vehicles to the road depending on the wheel contact patch (more precisely, the range of stresses from minimum to maximum). Figures 2A–2E show the results of calculations by category, and Figure 2F shows a comparison of the stress ranges for all categories, depending on tire pressure. The variation in tire pressure was taken from a condition of $\pm 15\%$ of the standard, the permissible deviations of which vary in the range of $\pm 2.5\%$. When the pressure decreases, the static radius decreases and the static deflection increases, therefore the contact patch increases. Conversely, when the pressure increases, the contact patch will increase, and consequently, the stress transmitted by the wheel will also increase. The values of the maximum permissible loads, static radii, tire widths, outer diameters, and rim diameters were taken from GOST [9-13]. Thus, the wheel contact patch was determined from the conditions of standard ($\rho_{St} = 100\%$), minimum ($\rho_{min} = 85\%$) and maximum ($\rho_{max} = 115\%$) tire pressure. It is logical that when tire pressure is low, the contact patch increases, thereby reducing road stress. For bicycles, the minimum road pressure at the minimum permissible tire pressure is 0.50 kg/cm^2 (48.7 kN/m^2), and the maximum pressure at the maximum permissible tire pressure is 2.34 kg/cm^2 (229.8 kN/m^2). The same values, under similar conditions, for motorcycles are: minimum stress – 1.13 kg/cm^2 (111.2 kN/m^2); maximum stress – 3.53 kg/cm^2 (346.2 kN/m^2). For passenger cars, the minimum stress is 1.72 kg/cm^2 (168.8 kN/m^2) and the maximum stress is 3.22 kg/cm^2 (316.2 kN/m^2). For light commercial vehicles, the minimum stress is 2.62 kg/cm^2 (257.2 kN/m^2)



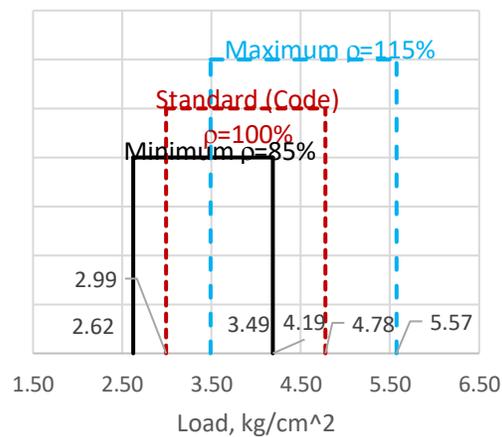
A - Category A1



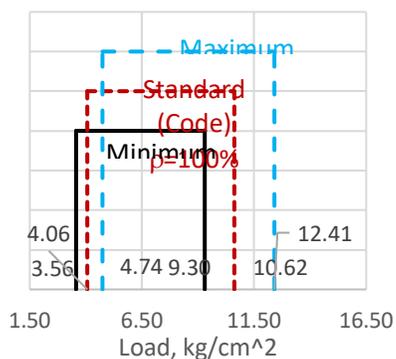
B - Category A2



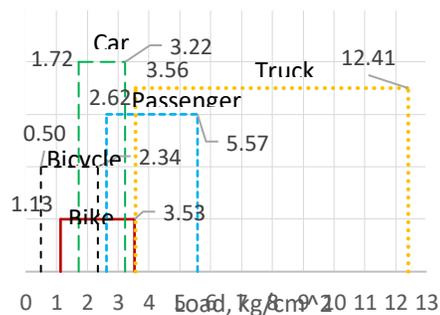
C - Category A3



D - Category A4



E - Category A5



F - Comparison

Figure 2. Wheel-to-road voltage ranges by category

For trucks, the minimum stress is 3.56 kg/cm² (349.4 kN/m²) and the maximum is 12.41 kg/cm² (1216.7 kN/m²). Thus, it is logical that trucks, due to their high weight relative to the size of their tires, transmit the greatest stress to the road. Moreover, given the degree of freedom of large trucks relative to the width of the lane, the degree of abrasion of the tread increases significantly. In other words, the width of the wheel's contact patch is smaller for large trucks than for small ones. Therefore, despite the relatively higher stress from a motorcycle (3.53 kg/cm² or 346.2 kN/m²) compared to a passenger car (3.22 kg/cm² or 316.2 kN/m²), the abrasion resistance of the impregnating compound for the latter will be higher.

Based on the data in Figure 2, a summary table of maximum permissible load limits by vehicle category was compiled (Table 2).

Table 2. Normal stress values from a motor vehicle wheel

Category		Spot area (S_t), cm ²			Stress on the road (σ_t)					
					ρ_{min}		ρ_{St}		ρ_{max}	
		ρ_{min}	ρ_{St}	ρ_{max}	kN/m ²	kg/cm ²	kN/m ²	kg/cm ²	kN/m ²	kg/cm ²
1	min	46.5	53.6	60.5	48.7	0.50	54.9	0.56	63.4	0.65
	max	25.6	29.4	32.9	178.7	1.82	200.2	2.04	229.8	2.34
2	min	85.2	99.1	112.7	111.4	1.13	126.7	1.29	147.4	1.50
	max	92.1	107.1	121.8	261.8	2.67	297.6	3.04	346.2	3.53
3	min	116.6	135.5	154.0	168.8	1.72	191.7	1.96	222.8	2.27
	max	173.7	202.3	230.3	238.5	2.43	271.5	2.77	316.2	3.22
4	min	146.6	171.0	194.9	259.0	2.62	295.3	3.01	344.5	3.51
	max	185.7	216.7	247.2	410.6	4.19	468.4	4.78	546.6	5.57
5	min	348.3	406.4	463.4	349.4	3.56	398.4	4.06	464.8	4.74
	max	362.9	423.9	484.1	912.1	9.30	1041.5	10.62	1216.7	12.41

Conclusion.

1) Calculations were made of the normal stress ranges from a motor vehicle wheel on the road surface, based on the standard characteristics of tires, permissible load values, and potential tire pressure.

2) For convenience, all motor vehicles were classified into categories based on their type,

purpose, and general characteristics reflecting their common properties: A1 – bicycles; A2 – motorcycles (mopeds); A3 – passenger cars; A4 – light trucks and buses with very low capacity; A5 – trucks and buses. For each category, stress ranges were calculated depending on the type of vehicle, the standard load capacity, and tire pressure.

3) For each category of motor vehicles, calculations of normal stresses on the road surface were performed: for category A1 the stress range is 48.7 kN/m² - 229.8 kN/m² (2.34 kg/cm²); for A2 111.4 kN/m² - 346.2 kN/m²; for A3 168.8 kN/m² - 316.2 kN/m²; for A4 259.0 kN/m² - 546.6 kN/m²; for A5 349.4 kN/m² - 1216.7 kN/m².

4) The results obtained will be useful for designing roadbeds and subgrade foundations, in particular for modeling vehicle loads in design schemes.

Acknowledgement. This research has been/was/is funded by the Science Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan (Grant No. AP26197579 «Development of the composition, production technology of an anti-icing agent for concrete roads based on latex emulsion and agricultural waste»).

The contribution of the authors:

L.T. Kabdyrova - data collection, editing

R.E. Lukpanov – concept, methodology, analysis, modeling

F.B. Abdushkurov – analysis, interpretation, visualization

M. Karacasu – editing.

References

1. Petukhov P.A. Cement concrete and asphalt concrete in the environmental aspect of the road industry//Ecology and scientific and technical progress. Urbanistics. -2013.- № 2- P.308-315.
2. Pshembaev M. K., Kovalev Ya. N., Shevchuk L. I. Stresses in cement concrete pavement caused by thermal shock//Science and Technology. -2016. № 2. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2016-15-2-87-94>
3. Ganza V. Destruction of snow and ice formations by mechanical means: monograph – Krasnoyarsk: Siberian Federal University, 2012. – P.192.
4. Pshembaev M. K., Kovalev Ya. N., Yaglov V. N., Girinsky V. V. Methods of combating winter slipperiness//Science and Technology. -2020.- №19(3)- P.230-240. <https://doi:10.21122/2227-1031-2020-19-3-230-240>
5. Lukpanov R. E., Dyusseminov D. S., Yenkebayev S. B., & Tsygulyov D. V. Impregnation composition to increase the ice-phobic properties of concrete roads. Retrieved from www.scopus.com. -2022. -№173- P.305-311. https://doi:10.1007/978-3-030-81289-8_39
6. Wang K., Nelsen D. E., Nixon W. A. Damaging effects of deicing chemicals on concrete materials//Cement and Concrete Composites. -2006.- №28(2)- P.173-188. <https://doi:10.1016/j.cemconcomp.2005.07.006>
7. Ma H., Yang R., Qian S. Research on asphalt concrete pavement deicing technology//Journal of Southeast University (English Edition). -2014. № 30(3) – P.336–342. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1003-7985.2014.03.015>

8. Medeiros M., Helene P. Efficacy of surface hydrophobic agents in reducing water and chloride ion penetration in concrete//Materials and Structures. -2008. № 41(1) -P.59–71. <https://doi.org/10.1617/s11527-006-9218-5>
9. Furmidge C. G. L. Studies at phase interfaces. I: The sliding of liquid drops on solid surfaces and a theory for spray retention//Journal of Colloid Science. -1962. №17(4) -P.309–324. [https://doi.org/10.1016/0095-8522\(62\)90011-9](https://doi.org/10.1016/0095-8522(62)90011-9)
10. Interstate standard GOST 4750. Pneumatic tires for bicycles. Technical specifications. - 2023. P.1-14. <https://internet-law.ru/gosts/gost/11205/>.
11. Interstate standard GOST 5652. Pneumatic tires for motorcycles, motorcycles, scooters and mopeds. Technical specifications. -2023. P.1-16. <https://internet-law.ru/gosts/gost/11351/>
12. Interstate standard GOST 52900. Pneumatic tires for passenger cars and trailers. Technical specifications. -2023. P. 1-23. <https://internet-law.ru/gosts/gost/47531/>
13. Interstate standard GOST 4754. Pneumatic tires for passenger cars, trailers, light trucks and buses of small capacity. Technical specifications. -2023. P. 1-33. <https://internet-law.ru/gosts/gost/7152>
14. Interstate standard GOST 5513. Pneumatic tires for trucks, trailers, buses and trolleybuses. Technical specifications. -2023. P. 1-22. <https://internet-law.ru/gosts/gost/46320/>
15. Lipkan A. V., Panasyuk A. N., Kashbulgayanov R. A. Justification for the choice of method for determining the parameters of the contact patch of a pneumatic wheeled vehicle with the supporting base //Bulletin of Science and Practice. – 2019. – № 5(6) – P.212–228. <https://doi.org/10.33619/2414-2948/43/27>

Л.Т.Кабдырова^{*1}, Р.Е. Лукпанов¹, Ф.Б. Абдушқуров², М. Караджасу³

¹ Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан

²Technobius, ЖШС, Астана, Қазақстан

³ Эскишехир техникалық университеті, Эскишехир, Түркия

Шинаның қысымына байланысты жанасу нүктесі бойынша автокөлік дөңгелегінен модельдік кернеулерді есептеу

Аңдатпа. Бұл мақалада нақты көрсеткіштер мен масштабтауды ескере отырып, модельдік доңғалақпен бетон жолына берілетін кернеулерді есептеуге және модельдеуге байланысты мұздан тазартқыштың сіңдіру құрамының тозуына арналған модельдік зерттеудің бір бөлігі келтірілген. Зерттеудің мақсаты шиналар қысымының төмендеуіне немесе жоғарылауына байланысты жанасу нүктесінің өзгергіштігін ескере отырып, көлікке ұшыраған кезде пайда болатын қалыпты кернеулерді бағалау болды. Есептеулер велосипедтерден бастап жүк көліктеріне дейінгі әртүрлі көлік түрлеріне арналған, олар шартты түрде А1-А5 санаттарына бөлінеді (көлік құралының массасының өсу ретімен). Есептеу нәтижелері автокөлік құралдарының түріне және нормативтік жүк көтергіштігіне байланысты пайдаланудан туындаған жол төсеміне қалыпты кернеулер диапазонымен

ұсынылған. Есептеулер қалыпты ауытқуды және шинаның өзгермелі потенциалдық қысымын ескере отырып, шинаның әмбебап сипаттамасының сызықтық графигі әдісімен орындалады. Есептеудің алынған нәтижелері жол жағдайларын сандық немесе масштабты модельдеу кезінде есептеу схемаларын дұрыс жасауға мүмкіндік береді.

Түйін сөздер: абразия, жанасу нүктесі, мұздану, модельдеу, жол жамылғысы, кернеу, қысым.

Л.Т.Кабдырова^{*1}, Р.Е. Лукпанов¹, Ф.Б. Абдушкuroв², М. Караджасу³

¹ *Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан*

² *ТОО Technobius, Астана, Казахстан*

³ *Эскишехирский технический университет, Эскишехир, Турция*

Расчет модельных напряжений от колеса автотранспорта по пятну контакта в зависимости от давления в шине

Аннотация. В настоящей статье представлена часть модельного исследования на истираемость пропиточного состава антиобледенителя, связанная с расчетом и моделированием напряжений, передаваемых модельным колесом на бетонную дорогу, с учетом фактических показателей и масштабирования. Целью исследования была оценка нормальных напряжений, возникающих при воздействии автотранспорта, с учетом изменчивости пятна контакта, обусловленной понижением или повышением давления в шинах. Расчеты выполнены для различных типов транспортных средств, от велосипедов до грузовых автомобилей, которые условно разделены на категории А1-А5 (в порядке возрастания массы транспортного средства). Результаты расчета представлены диапазонами нормальных напряжений на дорожное полотно, вызванных эксплуатацией автотранспортных средств, в зависимости от их типа и нормативной грузоподъемности. Расчеты выполнены методом линейного графика универсальной характеристики шины, с учетом нормального прогиба и вариативного потенциального давления в шине. Полученные результаты расчета позволят более корректно разрабатывать расчетные схемы при численном или масштабном моделировании дорожных ситуаций.

Ключевые слова: истирание, пятно контакта, обледенение, моделирование, дорожное покрытие, напряжение, давление.

References

1. Petukhov P.A. Cement concrete and asphalt concrete in the environmental aspect of the road industry//Ecology and scientific and technical progress. Urbanistics. -2013.- № 2- P.308-315.
2. Pshembaev M. K., Kovalev Ya. N., Shevchuk L. I. Stresses in cement concrete pavement caused by thermal shock//Science and Technology. -2016. № 2. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2016-15-2-87-94>
3. Ganza V. Destruction of snow and ice formations by mechanical means: monograph – Krasnoyarsk: Siberian Federal University, 2012. – P.192.
4. Pshembaev M. K., Kovalev Ya. N., Yaglov V. N., Girinsky V. V. Methods of combating winter

- slipperiness//Science and Technology. -2020.- №19(3)- P.230-240.
<https://doi:10.21122/2227-1031-2020-19-3-230-240>
5. Lukpanov R. E., Dyusseminov D. S., Yenkebayev S. B., & Tsygulyov D. V. Impregnation composition to increase the ice-phobic properties of concrete roads. Retrieved from www.scopus.com. -2022. -№173- P.305-311.
https://doi:10.1007/978-3-030-81289-8_39
 6. Wang K., Nelsen D. E., Nixon W. A. Damaging effects of deicing chemicals on concrete materials//Cement and Concrete Composites. -2006.- №28(2)- P.173-188.
<https://doi:10.1016/j.cemconcomp.2005.07.006>
 7. Ma H., Yang R., Qian S. Research on asphalt concrete pavement deicing technology//Journal of Southeast University (English Edition). -2014. № 30(3) – P.336–342. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1003-7985.2014.03.015>
 8. Medeiros M., Helene P. Efficacy of surface hydrophobic agents in reducing water and chloride ion penetration in concrete//Materials and Structures. -2008. № 41(1) -P.59–71.
<https://doi.org/10.1617/s11527-006-9218-5>
 9. Furmidge C. G. L. Studies at phase interfaces. I: The sliding of liquid drops on solid surfaces and a theory for spray retention//Journal of Colloid Science. -1962. №17(4) -P.309–324.
[https://doi.org/10.1016/0095-8522\(62\)90011-9](https://doi.org/10.1016/0095-8522(62)90011-9)
 10. Interstate standard GOST 4750. Pneumatic tires for bicycles. Technical specifications. -2023. P.1-14. <https://internet-law.ru/gosts/gost/11205/>.
 11. Interstate standard GOST 5652. Pneumatic tires for motorcycles, motorcycles, scooters and mopeds. Technical specifications. -2023. P.1-16. <https://internet-law.ru/gosts/gost/11351/>
 12. Interstate standard GOST 52900. Pneumatic tires for passenger cars and trailers. Technical specifications. -2023. P. 1-23. <https://internet-law.ru/gosts/gost/47531/>
 13. Interstate standard GOST 4754. Pneumatic tires for passenger cars, trailers, light trucks and buses of small capacity. Technical specifications. -2023. P. 1-33. <https://internet-law.ru/gosts/gost/7152>
 14. Interstate standard GOST 5513. Pneumatic tires for trucks, trailers, buses and trolleybuses. Technical specifications. -2023. P. 1-22. <https://internet-law.ru/gosts/gost/46320/>
 15. Lipkan A. V., Panasyuk A. N., Kashbulgayanov R. A. Justification for the choice of method for determining the parameters of the contact patch of a pneumatic wheeled vehicle with the supporting base //Bulletin of Science and Practice. – 2019. – № 5(6) – P.212–228.
<https://doi.org/10.33619/2414-2948/43/27>

Information about authors:

Kabdyrova L.T. – corresponding author, PhD Student, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan;
Lukpanov R.E. – PhD, Professor, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan;
Abdushkurov F.B. – Candidate of Technical Sciences, Technobius, LLP, Astana, Kazakhstan;
Karacasu M.– PhD, Professor, Eskisehir Technical University, Eskisehir, Turkey.

Кабдырова Л.Т. - автор для корреспонденции, докторант PhD, Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан.

Лукпанов Р.Е. - PhD, профессор, Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан;

Абдушқуров Ф.Б. - кандидат технических наук, ТОО «Технобиус», Астана, Казахстан;

Караджасу М. - PhD, профессор, Эскишехирский технический университет, Эскишехир, Турция.

Кабдырова Л.Т. - хат-хабар авторы, PhD докторанты, Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия Ұлттық Университеті, Астана, Қазақстан;

Лукпанов Р.Е. - PhD, профессор, Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия Ұлттық Университеті, Астана, Қазақстан;

Абдушқуров Ф.Б. - техника ғылымдарының кандидаты, "Технобиус" ЖШС, Астана, Қазақстан;

Караджасу М. - PhD, профессор, Эскишехир техникалық университеті, Эскишехир, Түркия.



Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).



IRSTI 67.01.81

Article

<https://doi.org/10.32523/2616-7263-2026-154-1-35-48>

Digital simulation of soil sieve analysis: visualization of the laboratory process and practical relevance

A.Tulebekova^{1*} , N. Denissova² , B. Kastrati¹ 

¹ L.N.Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan

² D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan

*E mail: *tulebekova_as@enu.kz, ²ndenisova@edu.ektu.kz, ¹kastratibekim73@gmail.com*

Abstract. This paper presents approaches for enhancing the accuracy and methodological transparency of laboratory determinations of soil grain-size distribution using digital simulation. The study aims to develop and implement an interactive model of the sieve analysis process that visualizes the sequence of laboratory operations and highlights the importance of a standardized procedure. The scientific significance lies in formalizing the traditional testing methodology and creating an algorithm that enables precise reproduction in a digital environment. The practical relevance of the research stems from the simulation's ability to compensate for the limitations of real laboratory conditions, where alternative sieving scenarios cannot always be reproduced, thereby reducing the accuracy and repeatability of results. This issue is critical not only in education but also in engineering practice, where insufficient sieving completeness may distort grain-size characteristics and, consequently, lead to errors in construction design and bearing-capacity assessment. Incorporating these aspects into the digital simulation improves methodological awareness. It expands its applicability to both academic and engineering contexts, providing an additional tool for quality control and strengthening the reliability of geotechnical decision-making.

Keywords: grain-size distribution, sieve analysis, soil testing, digital simulation, laboratory methodology.

Introduction

Soil grain size distribution is one of the key indicators determining the engineering-geological and construction properties of soil [1-2]. The distribution of particles by size determines the filtration characteristics, density, compactability, water permeability, and behavior of soil under load [3]. Therefore, sieve analysis, traditionally used in laboratory practice, occupies a central place in the training program for future construction specialists. Despite its simplicity, the sieving technique has several aspects that directly affect the accuracy of the results obtained and the correctness of the subsequent engineering interpretation [4].

Today, many studies examine the effectiveness of various scenarios, methods, and tools for soil granulometry [5-7]. This study analyzes the possibilities of mathematical modeling to describe the particle size distribution (PSD) of soils, which is an important source of information about the gradation and distribution of particle sizes. The authors [8] compare the predictive capabilities of three groups of mathematical models, selecting the nine most robust and proven options from previous studies. The evaluation uses 144 experimental data sets across 12 soil texture classes from the UNSODA database. Attention was paid to the models' ability to predict values at points not included in the sample, which is key to correctly restoring the shape of the PSD curve. To do this, a comprehensive ranking method and relative error assessment were used to compare the effectiveness of models on different texture classes. The results showed that the number of the model's parameters is not directly related to the accuracy of predictions. The Skaggs and Weipeng models demonstrated the best results in interpolation and extrapolation. Thus, the study emphasizes the importance of choosing the correct function when analyzing different types of soils.

In the following work, [9] proposes an improved mechanical method of washing and sieving to obtain an accurate particle size distribution of soil. The developed technology is an extension of the previously created manual method of «extended wet sieving» and is based on the modernization of a traditional vibrating sieving machine. The improved design includes steel sieves with a mesh size of 0.063 mm and ten fabric sieves with apertures ranging from 0.048 to 0.0008 mm, which allows for effective separation of silt and clay particles. The machine generates three-dimensional movement and vibration, ensuring the rapid passage of particles smaller than the sieve apertures.

The authors propose utilizing machine learning to enhance the accuracy and reproducibility of estimates. To determine the applicability of existing approaches, the researchers [10] conducted a comparative study that assessed the effectiveness of eleven mathematical models and three machine learning algorithms previously used to analyze soils in the northwestern Himalayan region. Such a comparative analysis was necessary because a correct model must adequately describe the entire PSD curve for different soil types. The quality of the selection was assessed using standard criteria: the adjusted coefficient of determination, the Akaike information criterion, and the root mean square error. The most accurate results among the mathematical models were shown by the Fredlund, Weibull, and Rosin–Ramler models, while the Gompertz, S-curve, and Van Genuchten models demonstrated an insufficient level of correspondence with the experimental data. Thus, the authors note that modern ML approaches have significant potential for PSD modeling, surpassing traditional mathematical functions in accuracy, especially when analyzing

complex soil samples.

In continuing the study, it should be noted that one of the equally important factors to consider is the completeness of sieving, the degree to which particles of different sizes are distributed across the sieves during the test [11-12]. In educational settings, students usually encounter only one scenario: a single sample is sieved, and a single particle-size distribution curve is obtained. However, a single observation does not allow the full sensitivity of the method to changes in testing conditions or possible deviations from the standard procedure to be identified. Acquiring skills in how significantly even a small violation of the completeness of sieving can affect the final shape of the curve, the classification of the soil, and, consequently, the choice of its application in construction.

Traditional laboratory work does not allow such changes to be fully demonstrated, since conducting several full-fledged tests within a single class requires significant time and labor resources. Repeated sieving, particularly under deliberately altered conditions leading to incomplete sieving, is not typically included in the teaching format and is rarely performed. As a result, only a single reference outcome is observed, without comparison to alternative results arising from procedural deviations that are common in real practice. This limits the depth of understanding of the method and reduces future engineers' ability to evaluate the reliability of the data obtained critically. In addition to the educational environment, the issue of complete sieving is also significant in industrial practice, especially when implementing large-scale construction and infrastructure projects. In conditions of large volumes of engineering-geological work, laboratory tests are often carried out in an accelerated mode, which simplifies individual stages of the methodology. These seemingly insignificant deviations can accumulate and affect the final assessment of soil properties.

The methodology

The study included four key stages presented in Figure 1. The sequential implementation of these stages ensured the collection of reliable experimental data and its further use in the development of a digital model. Accordingly, the first stage of the study included laboratory determination of the soil particle-size distribution in accordance with the standard [13].

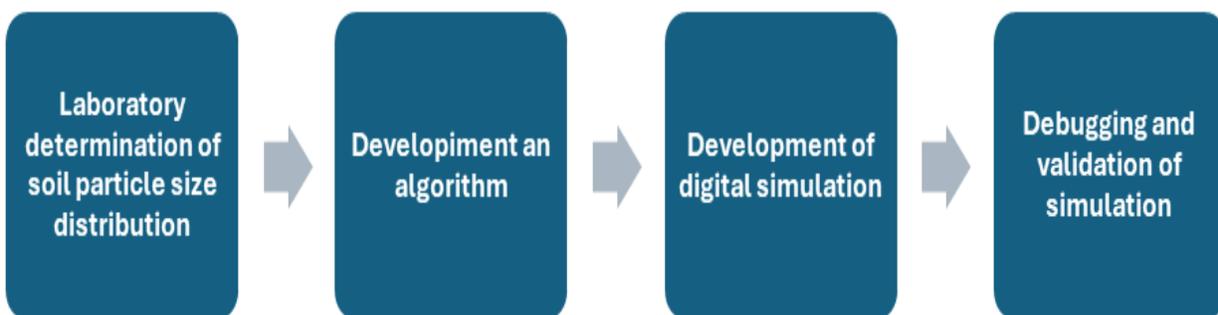


Figure 1. Research workflow

The laboratory setup included a complete set of soil-testing sieves with mesh openings ranging from 10 mm to 0.1 mm, arranged in descending order of aperture size. For weighing operations,

both analytical and technical laboratory balances were employed, the latter ensuring a relative weighing accuracy better than 0.1% (Figure 2).



Figure 2. Process of testing

Standard supporting equipment, such as a porcelain mortar and pestle with a rubber tip for gentle disaggregation of soil aggregates, a porcelain cup, a brush for cleaning the sieve surfaces, and auxiliary tools for sample handling, was also used [13-14]. All drying procedures were performed using a laboratory drying oven and a sand bath to ensure a constant mass of the soil sample before analysis. An average soil sample was prepared using the quartation method and subsequently dried to constant mass. The sieves were mounted in a vertical column and positioned on a receiving pan. The prepared sample was carefully placed onto the upper sieve and covered with a lid. Sieving was first performed manually through light lateral tapping of the sieve column until the passage of soil particles stabilized.

The fractions retained on each sieve were then collected sequentially, beginning from the uppermost sieve. To ensure complete disaggregation of soil aggregates, the retained material was gently ground in a porcelain mortar using a pestle with a rubber tip and reintroduced into the sieve column for repeated sieving. This step ensured that each grain-size fraction contained only individual particles rather than composite aggregates. The completeness of sieving was checked by shaking each sieve over a clean sheet of paper and visually confirming that no additional particles passed through. The mass of each retained fraction was determined using laboratory balances.

In the second stage of the study, the actual laboratory sieve analysis method was presented as an algorithm suitable for subsequent transfer to a digital environment. Based on the experimental protocol, the main operations, the sequence of actions performed, and the key control points directly affecting the particle size analysis result were identified. First, the sample preparation procedure was structured: actions for taring the tray, collecting soil, controlling the sample weight, and recording the initial parameters were defined. Next, the assembly of the sieve column was formalized, including the order of sieve arrangement by hole size, checking the weight of each empty sieve, and its identification in the system. The sieving process was presented as a sequence of actions: installing the column on a vibrating platform, starting and stopping the device, and

checking the completeness of the sieving. Attention was paid to steps that could lead to methodological deviations in real testing: the appearance of particles when shaking over a sheet of paper (incomplete sieving) or their absence (complete sieving). These situations were included in the algorithm as several scenarios. The final block of the formalized procedure included weighing the residue on each sieve, automatically constructing a table of fractional composition, and calculating the distribution of mass and pass percentages. Both variants of the incomplete and complete sieving scenarios were integrated into the structure, which made it possible to subsequently programmatically simulate the two modes of operation.

The digital simulation was developed using object-oriented programming technologies with ActionScript, which enabled the implementation of interactive elements, particle animation, and visual support for the stages of sieve analysis. The development environment used allowed for the creation of step-by-step user scenarios, including the selection of sieves, simulation of the sieving process, and automatic construction of a particle size distribution curve. The simulation was implemented as a low-resource application running in a standard IBM PC-compatible software environment. For it to work correctly, a basic computer configuration with an Intel Pentium 2 GHz processor and 256 MB of RAM is sufficient, which confirms the accessibility of the solution for educational audiences and allows it to be used on a wide range of devices.

Simulation debugging included verifying the correctness of the sieving algorithm, comparing calculated values with laboratory test results, and evaluating operational stability across various scenarios (complete and incomplete sieving). The logical sequence of stages and the correctness of the recalculation of the mass fractions were checked.

Findings/Discussion

Based on the sieve analysis performed, a distribution of fractions was obtained that characterizes the soil's structural features. The masses of soil fractions are presented in Figure 3. Depending on the percentage of these fractions, the soil classification was subsequently determined. Each fraction affects the soil's ability to retain water and interact with external loads, which is important to consider when designing construction projects.

Particle size, mm	Percent passing, %
10	90.04
5	80
2	68.06
1	54
0.5	21.08
0.25	16.1
0.1	7.06
0.05	0

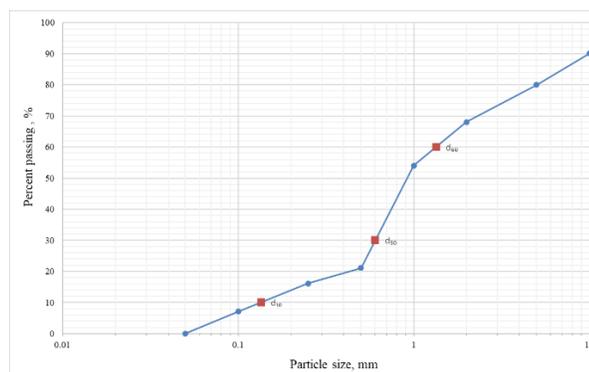


Figure 3. Particle size distribution: experimental data

The developed algorithm for the laboratory sieve analysis method, to be subsequently transferred to a digital environment, is shown in Figure 4.

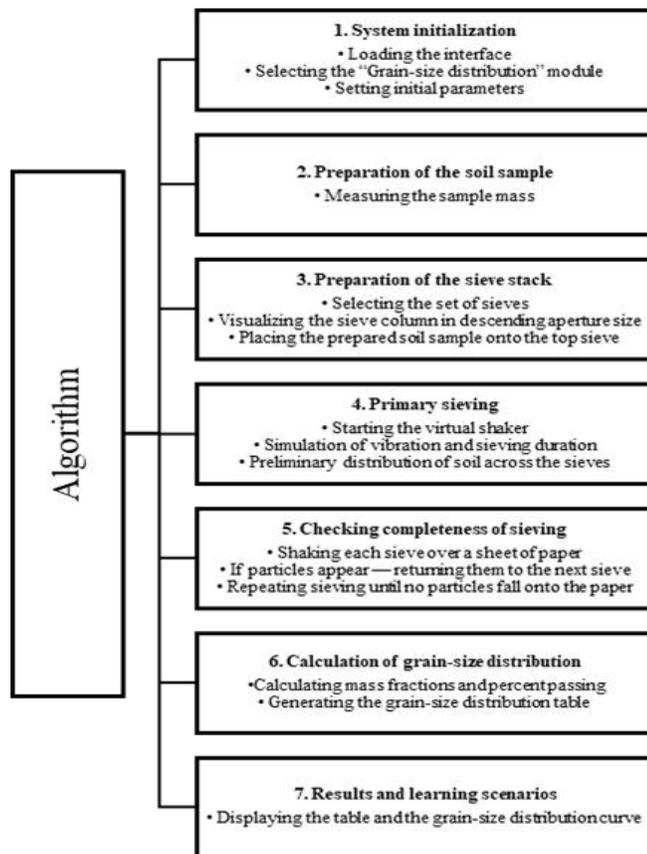


Figure 4. Algorithm for soil sieve testing

The algorithm reflects the sequence of operations performed when determining the granulometric composition of soil and serves as a basic model for subsequent digital implementation.

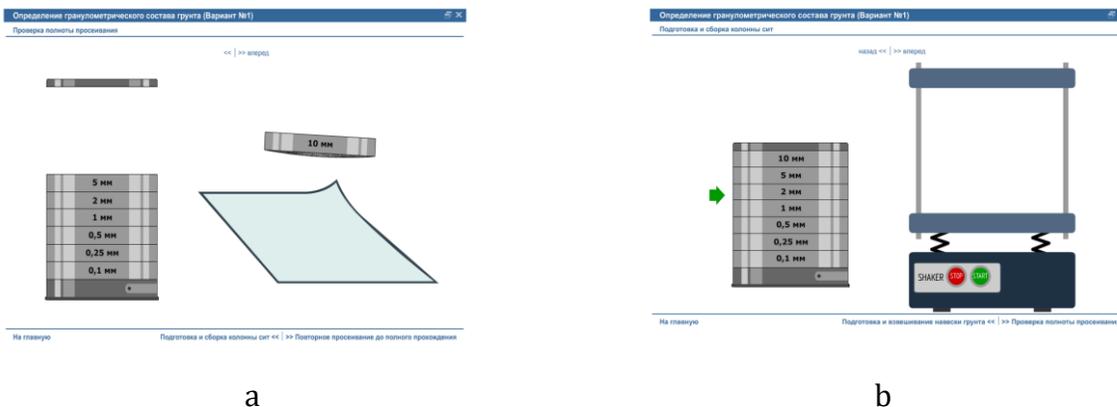


Figure 5. Test version of digital simulation: a) verification of sieving completeness; b) during the testing procedure [15]

Each stage of the algorithm is highlighted as a separate technological procedure, which ensures the accuracy and reproducibility of the description of the actual laboratory process. Such detail eliminates the variability that arises when tests are performed by different operators and establishes uniform requirements for the sequence of actions. Visualization helps to identify the stages that are critical for visualization in the simulation, including checking the completeness of sieving and processing residual particles. Based on this, the functional modules of the digital model and the logic of transitions between them were established. As a result, the algorithm ensured the correct transformation of the traditional methodology into an interactive digital format designed for educational and practical purposes. The developed digital simulation, based on experimental data and allowing the reproduction of various sieving scenarios, is shown in Figure 5.

Simulation allows soil testing and study of the methods of complete sieving and incomplete sieving, in which some fractions are retained on the surface of the sieves, and some end up on a sheet of paper after testing. This opportunity is significant for students, allowing them to obtain and compare two such results simultaneously. The debugging results showed that the simulation correctly reproduces the sieve analysis algorithm. The shape of the particle size distribution curve also fully corresponded to the laboratory curve. The interface modules worked stably during repeated actions, and transitions between simulation stages were performed without interruptions. Thus, the experimental digital simulation demonstrated stability, reliability of results, and readiness for use in educational and demonstration practices..

Table 1. Methodological Value of the Simulation

№	Scenario	Potential consequences	Methodological value of the simulation
1	Particles are not transferred to the next sieve after shaking above the paper	Underestimation of fine fractions, distorted particle size distribution, and incorrect soil classification	The simulation demonstrates that incomplete particle transfer results in inaccurate fraction distribution.
2	Particles are transferred to the next sieve, but repeated sieving is omitted	Fine particles remain trapped; overestimation of coarse fractions	The simulation illustrates the effect of incomplete sieving on the final particle size distribution.
3	The sieving completeness check in the paper is omitted	High risk of systematic error; misrepresentation of grain-size composition	The simulation visualizes the critical role of sieving completeness verification.
4	Completeness verification is performed for only one sieve, while others are ignored	Irregular errors in individual fractions; inconsistent results	The simulation emphasizes the necessity of verifying every sieve in the set.
5	Shaking above the paper is performed for an insufficient duration	Residual particles remain; slight systematic overestimation of coarse fractions	The simulation reveals measurable differences between full and incomplete sieving.

One of the key results of the development is the ability to demonstrate the complete procedure for checking the completeness of sieving. In traditional laboratory conditions, students often work with soils that either pass completely through the sieve on the first cycle or contain a minimal amount of residue. In such cases, students do not have the opportunity to observe an alternative scenario — the appearance of particles on a sheet of paper when checking the completeness of sieving and the need to return them to the next sieve for subsequent re-sieving. As a result, an important methodological element of the procedure goes unnoticed, although it is precisely this element that ensures accuracy and prevents material loss. The developed simulation compensates for this limitation of real laboratory practice by allowing both scenarios, complete and incomplete sieving, to be reproduced, regardless of the properties of a particular soil sample. This expands the educational potential of the methodology and ensures the mastery of the critically important stage of checking the completeness of sieving.

The developed simulation accurately reproduces the standardized stages of the sieve analysis procedure, visualizing each step in accordance with the requirements of the standard methodology. This enables the user to clearly observe how the completeness check is performed, how particles are redistributed, and why repeated verification is essential to the process. Such detailed visualization serves as a preventive function, helping to avoid typical mistakes that are frequently made during the first independent execution of the test. The scenarios presented in Table 1 illustrate the potential consequences of deviations from the standardized procedure, while the simulation acts as a tool for giving a consistent understanding of the correct sequence of operations and their impact on the final grain-size distribution

From a methodological point of view, the simulation highlights two important aspects:

- The accuracy of sieve analysis depends not only on the equipment, but also on the operators' compliance with the regulated procedure.
- The lack of sieving completeness control is a source of systematic errors that are difficult to detect and diagnose by indirect signs.

Thus, simulation serves as a tool for teaching the accuracy of laboratory testing, minimizing material losses, and improving the quality of particle size distribution determination. This makes it a significant element in the training of future builders, developing both technical skills and engineering thinking based on an understanding of the cause-and-effect relationships between test quality and the reliability of engineering solutions. Moreover, simulation expands not only the educational but also the practical professional scope of application, helping to reduce risks when making engineering decisions at the stages of research, design, and quality control of work.

Conclusion

A digital simulation of soil sieve analysis was developed based on experimental data and the algorithmization of the laboratory procedure. The model reproduces the key stages of the methodology, including verification of the completeness of sieving, which often remains out of sight of students in normal laboratory conditions. The simulation demonstrates the impact of correct operation on the final distribution of fractions and promotes a better understanding of the standardized process. The resulting tool expands the possibilities of training and can serve as a basis for further improvement of digital techniques in engineering practice. Research conclusions:

- Algorithmic modeling of the methodology allowed the identification of key stages of sieve analysis and the assessment of their influence on result reliability.
- The use of ActionScript provided flexibility in visualization and the ability to create a step-by-step interactive model without reducing computational accuracy.
- Debugging of the simulation showed its resistance to variable scenarios and demonstrated the value of the digital tool for ensuring the correct execution of the laboratory process.

Funding: This research has been/was/is funded by the Science Committee of the Ministry of Science and Higher Education of the Republic of Kazakhstan (Grant No. AP26195121 «Development of an educational digital platform for future builders with simulation of construction processes and integration with measuring devices via IoT»).

The contribution of the authors:

Tulebekova A. – development of the research concept, critical review of content.

Denissova N. – verification of the developed simulation module.

Kastrati B. – review of sources

References

1. An investigation in laser diffraction soil particle size distribution analysis to obtain compatible results with sieve and pipette method / D.N. Svensson, I. Messing, J. Barron // Soil and Tillage Research. — 2022. — Vol. 223. — P. 105450. DOI: 10.1016/j.still.2022.105450
2. Real Time Virtual Laboratory Solution Prototype and Evaluation for Online Engineering Degree Programs / M. Alkhatib, Y. Qu, R. Cai, R.A.G. Unglaub, R. Ritter // IEEE Access. — 2023. — T. 11. — pp. 130508–130516. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3334262
3. Critical Evaluation of Particle Size Distribution Models Using Soil Data Obtained with a Laser Diffraction Method / W. Weipeng, L. Jianli, Z. Bingzi, Z. Jiabao, L. Xiaopeng, Y. Yifan // PLOS ONE. — 2015. — Vol. 10, No. 4. — P. e0125048. DOI: 10.1371/journal.pone.0125048
4. Particle Size Distribution of Various Soil Materials Measured by Laser Diffraction—The Problem of Reproducibility / C. Polakowski, M. Ryżak, A. Sochan, M. Beczek, R. Mazur, A. Bieganowski // Minerals. — 2021. — Vol. 11, No. 5. — P. 465. DOI: 10.3390/min11050465
5. A novel and simple method for accurate prediction of soil particle-size distribution from limited soil texture data / H. Mozaffari, A.A. Moosavi, J.A.M. Demattê, W. Cornelis // Soil and Tillage Research. — 2026. — Vol. 256. — P. 106858. DOI: 10.1016/j.still.2025.106858
6. Effect of Grain Size Distribution of Sandy Soil on Shearing Behaviors at Soil–Structure Interface / H.-L. Wang, W.-H. Zhou, Z.-Y. Yin, X.-X. Jie // Journal of Materials in Civil Engineering. — 2019. — Vol. 31, No. 10. — P. 04019238. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002880

7. Analyzing the influence of particle size distribution on the maximum shear modulus of soil with an interpretable machine learning framework and laboratory test dataset [Text] / X. Liu, D. Zou, Y. Chen, H. Pei, Z. Li, L. Sun, L. Song // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. — 2025. — Vol. 188. — P. 109031. DOI: 10.1016/j.soildyn.2024.109031
8. Performance Comparison of Different Particle Size Distribution Models in the Prediction of Soil Particle Size Characteristics / H. Zhang, C. Wang, Z. Chen, Q. Kang, X. Xu, T. Gao // Land. — 2022. — Vol. 11, No. 11. — P. 2068. DOI: 10.3390/land11112068
9. Rotary vibrating machine-based washing and sieving method for soil classification / S. Ma, W.V. Yue, Z.Q. Yue // Frontiers of Structural and Civil Engineering. — 2024. — Vol. 18, No. 12. — P. 1865–1887. DOI: 10.1007/s11709-024-1127-6
10. Mathematical vs. machine learning models for particle size distribution in fragile soils of North-Western Himalayas / O. Bashir, S.A. Bangroo, S.S. Shafai, T.I. Shah, S. Kader, L. Jaufer, N. Senesi, A. Kuriqi, N. Omidvar, S. Naresh Kumar, A. Arunachalam, R. Michael, M. Ksibi, V. Spalevic, P. Sestras, S.B. Marković, P. Billi, S. Ercişli, A. Hysa // Journal of Soils and Sediments. — 2024. — Vol. 24, No. 6. — P. 2294–2308. DOI: 10.1007/s11368-024-03820-y
11. Grain Size Influence on the Compaction Aptitude and the Bearing Strength of the Gravel Lateritic Soils / B.O. Diop, I. Gbaguidi, P.G. Lo, A. Cisse, S. Sène, M. Ba // Geomaterials. — 2018. — Vol. 08, № 04. — pp. 63–76. DOI: 10.4236/gm.2018.84005
12. Effect of grain size distribution on the shear properties of sand / H. Guo, S. Wang, C. Guo, K. Yang, R. Guo, J. Fu, Y. Nan, M. Tao // Frontiers in Materials. — 2023. — Vol. 10. — p. 1219765. DOI: 10.3389/fmats.2023.1219765
13. GOST 12536–2014. Soils. Methods of laboratory granulometric (grain-size) and microaggregate distribution. Moscow: Standardinform, 2014. 19 p.14.
14. GOST 25100–2020. Soils. Classification. Moscow: Standardinform, 2020. 40 p.
15. Tulebekova A. Digital educational simulation for determining the grain size distribution of soil: Certificate of State Registration of Copyright No. 66886. Registration date: 30 January 2026.

А.С. Тулебекова^{1*}, Н.Ф.Денисова², Б.Кастрати¹

¹Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан

²Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Өскемен, Қазақстан

Цифрлық топырақ елеу симуляциясы: зертханалық үдерісті визуализациялау және практикалық маңыздылығы

Аңдатпа. Мақалада топырақтың гранулометриялық құрамын зертханалық жағдайда анықтаудың дәлдігі мен әдістемелік айқындығын арттыруға бағытталған цифрлық симуляцияны қолдану тәсілдері қарастырылады. Зерттеудің мақсаты – елеу талдауындағы зертханалық операциялардың дәйектілігін визуализациялайтын және стандартталған

процедураның маңызын көрсететін интерактивті модельді әзірлеу және енгізу. Жұмыстың ғылыми маңыздылығы дәстүрлі сынақ әдістемесін формализациялауға және оны цифрлық ортада дәл қайта жаңғыртуға мүмкіндік беретін алгоритмді жасауға негізделген. Практикалық маңыздылығы – нақты зертханалық жағдайда балама елеу сценарийлерін әрдайым орындау мүмкін еместігіне байланысты симуляцияның бұл шектеулерді өтеу қабілетінде, бұл нәтижелердің дәлдігі мен қайталанғыштығын төмендетеді. Бұл мәселе тек білім беру саласында ғана емес, инженерлік тәжірибеде де өзекті, себебі елеудің толық орындалмауы гранулометриялық сипаттамалардың бұрмалануына, сондай-ақ негіздерді жобалаудағы және көтергіштік қабілетін бағалаудағы қателіктерге әкелуі мүмкін. Осындай аспектілердің цифрлық модельге енгізілуі әдістемелік түсініктілікті арттырып, оның оқу және инженерлік ортадағы қолданылу аясын кеңейтеді және сапаны бақылаудың қосымша құралы ретінде геотехникалық шешімдердің сенімділігін күшейтеді.

Түйін сөздер: гранулометриялық құрам, елеу талдауы, топырақ сынақтары, цифрлық симуляция, зертханалық әдістеме.

А.С.Тулбекова^{1*}, Н.Ф.Денисова², Б.Кастрати¹

¹Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан

*²Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева,
Усть-Каменогорск, Казахстан*

Цифровая симуляция ситового анализа грунта: визуализация лабораторного процесса и практическая значимость

Аннотация. В статье представлены подходы к повышению точности и методической прозрачности лабораторного определения гранулометрического состава грунта с применением цифровой симуляции. Цель исследования заключается в разработке и внедрении интерактивной модели процесса ситового анализа, позволяющей визуализировать последовательность лабораторных операций и подчеркнуть важность соблюдения стандартизированной процедуры. Научная значимость работы заключается в формализации традиционной методики испытаний и создании алгоритма, обеспечивающего её точное воспроизведение в цифровой среде. Практическая значимость связана со способностью симуляции компенсировать ограничения реальных лабораторных условий, при которых альтернативные сценарии просеивания не всегда могут быть воспроизведены, что снижает точность и повторяемость результатов. Данный аспект важен не только в образовательной среде, но и в инженерной практике, так как недостаточная полнота просева может привести к искажению истинных значений гранулометрических характеристик грунта и привести к ошибкам в проектировании оснований и оценке несущей способности. Включение этих аспектов в цифровую модель повышает методическую осознанность и расширяет её применимость как в учебных, так и в профессиональных инженерных контекстах, являясь дополнительным инструментом контроля качества и повышения надежности геотехнических решений.

Ключевые слова: гранулометрический состав, ситовый анализ, испытание грунтов, цифровая симуляция, лабораторная методика.

References

1. An investigation in laser diffraction soil particle size distribution analysis to obtain compatible results with sieve and pipette method / D.N. Svensson, I. Messing, J. Barron // Soil and Tillage Research. — 2022. — Vol. 223. — P. 105450. DOI: 10.1016/j.still.2022.105450
2. Real Time Virtual Laboratory Solution Prototype and Evaluation for Online Engineering Degree Programs / M. Alkhatib, Y. Qu, R. Cai, R.A.G. Unglaub, R. Ritter // IEEE Access. — 2023. — T. 11. — pp. 130508–130516. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3334262
3. Critical Evaluation of Particle Size Distribution Models Using Soil Data Obtained with a Laser Diffraction Method / W. Weipeng, L. Jianli, Z. Bingzi, Z. Jiabao, L. Xiaopeng, Y. Yifan // PLOS ONE. — 2015. — Vol. 10, No. 4. — P. e0125048. DOI: 10.1371/journal.pone.0125048
4. Particle Size Distribution of Various Soil Materials Measured by Laser Diffraction—The Problem of Reproducibility / C. Polakowski, M. Ryżak, A. Sochan, M. Beczek, R. Mazur, A. Bieganski // Minerals. — 2021. — Vol. 11, No. 5. — P. 465. DOI: 10.3390/min11050465
5. A novel and simple method for accurate prediction of soil particle-size distribution from limited soil texture data / H. Mozaffari, A.A. Moosavi, J.A.M. Demattê, W. Cornelis // Soil and Tillage Research. — 2026. — Vol. 256. — P. 106858. DOI: 10.1016/j.still.2025.106858
6. Effect of Grain Size Distribution of Sandy Soil on Shearing Behaviors at Soil–Structure Interface [Text] / H.-L. Wang, W.-H. Zhou, Z.-Y. Yin, X.-X. Jie // Journal of Materials in Civil Engineering. — 2019. — Vol. 31, No. 10. — P. 04019238. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002880
7. Analyzing the influence of particle size distribution on the maximum shear modulus of soil with an interpretable machine learning framework and laboratory test dataset [Text] / X. Liu, D. Zou, Y. Chen, H. Pei, Z. Li, L. Sun, L. Song // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. — 2025. — Vol. 188. — P. 109031. DOI: 10.1016/j.soildyn.2024.109031
8. Performance Comparison of Different Particle Size Distribution Models in the Prediction of Soil Particle Size Characteristics / H. Zhang, C. Wang, Z. Chen, Q. Kang, X. Xu, T. Gao // Land. — 2022. — Vol. 11, No. 11. — P. 2068. DOI: 10.3390/land11112068
9. Rotary vibrating machine-based washing and sieving method for soil classification / S. Ma, W.V. Yue, Z.Q. Yue // Frontiers of Structural and Civil Engineering. — 2024. — Vol. 18, No. 12. — P. 1865–1887. DOI: 10.1007/s11709-024-1127-6
10. Mathematical vs. machine learning models for particle size distribution in fragile soils of North-Western Himalayas / O. Bashir, S.A. Bangroo, S.S. Shafai, T.I. Shah, S. Kader, L. Jaufer, N. Senesi, A. Kuriqi, N. Omidvar, S. Naresh Kumar, A. Arunachalam, R. Michael, M. Ksibi, V. Spalevic, P. Sestras, S.B. Marković, P. Billi, S. Ercişli, A. Hysa // Journal of Soils

- and Sediments. — 2024. — Vol. 24, No. 6. — P. 2294–2308. DOI: 10.1007/s11368-024-03820-y
11. Grain Size Influence on the Compaction Aptitude and the Bearing Strength of the Gravel Lateritic Soils / B.O. Diop, I. Gbaguidi, P.G. Lo, A. Cisse, S. Sène, M. Ba // Geomaterials. — 2018. — Vol. 08, № 04. — pp. 63–76. DOI: 10.4236/gm.2018.84005
 12. Effect of grain size distribution on the shear properties of sand [Текст] / H. Guo, S. Wang, C. Guo, K. Yang, R. Guo, J. Fu, Y. Nan, M. Tao // Frontiers in Materials. — 2023. — Vol. 10. — p. 1219765. DOI: 10.3389/fmats.2023.1219765
 13. GOST 12536–2014. Soils. Methods of laboratory granulometric (grain-size) and microaggregate distribution. Moscow: Standardinform, 2014. 19 p.14.
 14. GOST 25100–2020. Soils. Classification. Moscow: Standardinform, 2020. 40 p.
 15. Tulebekova A. Digital educational simulation for determining the grain size distribution of soil: Certificate of State Registration of Copyright No. 66886. Registration date: 30 January 2026.

Information about the authors:

Tulebekova A. – corresponding author, PhD, Professor, Department of «Civil Engineering», L.N. Gumilyov Eurasian National University, K. Munaitpassov 13, 010008, Astana, Republic of Kazakhstan

Denissova N. – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University, Protozanova, 69, 070000, Ust-Kamenogorsk, Republic of Kazakhstan

Kastrati B. – PhD student, Department of «Civil Engineering», L.N. Gumilyov Eurasian National University, K. Munaitpassov 13, 010008, Astana, Republic of Kazakhstan

Тулебекова А.С. – автор для корреспонденции, PhD, профессор кафедры «Строительство» Евразийского национального университета имени Л.Н. Гумилева, К.Мунайтпасова 13, 010008, Астана, Казахстан

Денисова Н.Ф. – кандидат физико-математических наук, ассоциированный профессор (доцент) Восточно-Казахстанского технического университета имени Д. Серикбаева, Протозанова 69, 070000, Усть-Каменогорск, Казахстан

Кастрати Б. – докторант PhD кафедры «Строительство» Евразийского национального университета имени Л.Н. Гумилева, К.Мунайтпасова 13, 010008, Астана, Казахстан

Тулебекова А. С. – хат-хабар авторы, PhD, Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университетінің «Құрылыс» кафедрасының профессоры, Қ. Мұңайтпасов көшесі 13, 010008, Астана, Қазақстан.

Денисова Н.Ф. – физика-математика ғылымдарының кандидаты, Д. Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университетінің доценті, Протозанова 69, 070000, Өскемен, Қазақстан

Кастрати Б. – докторант, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, «Құрылыс» кафедрасы, Қ. Мұңайтпасов көшесі 13, 010008, Астана, Қазақстан,



Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).O



ХҒТАР 67.11.03
Ғылыми мақала

<https://doi.org/10.32523/2616-7263-2026-154-1-49-65>

Жер сілкінісі әсерін төмендетуге арналған геотехникалық сейсмоқорғаудың (GSI) сенімділігі

Р. Шегенбаева¹ , Е. Бесимбаев² , А. Шадкам² , С. Ниетбай^{*2,3,4} 

¹ Қорқыт Ата атындағы Қызылорда университеті, Қызылорда қ., Қазақстан

² Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті, Алматы қ., Қазақстан

³ Халықаралық білім беру корпорациясы, Алматы қ., Қазақстан

⁴ «Қазақ бас сәулет-құрылыс академиясы» ЖШС, Алматы қ., Қазақстан

*E mail: sh.raihan@mail.ru, y.bessimbayev@satbayev.university,
asylbek.shadkam@stud.satbayev.university sayat_90@inbox.ru*

Аңдатпа. Мақала сейсмикалық қауіпті аймақтарда орналасқан ғимараттардың сенімділігі мен орнықтылығын арттыру мақсатында топырақтық төсеніштер түріндегі геотехникалық сейсмоқшаулау, негіз және конструкцияның өзара әрекеттесуін зерттеуге арналған. Зерттеудің мақсаты – топырақтық төсеніштер түріндегі геотехникалық сейсмоқшаулауы бар ғимараттардың сейсмикалық сенімділігін сандық модельдеу және берілген қарқындылықтағы жер сілкіністері кезінде негіз деформациясы мен ғимараттың динамикалық сипаттамаларын ықтималдық тұрғыда бағалау. Зерттеу әдістеріне теориялық талдау, PLAXIS 2D бағдарламасында шекті элементтер әдісімен сандық модельдеу, алынған нәтижелерді интерпретациялау және статистикалық біртекті еместік пен кездейсоқ әсерлерді ескеретін ықтималдық әдістер арқылы ғимарат сенімділігін есептеу кіреді. Алынған нәтижелер топырақтық төсеніштер түріндегі геотехникалық сейсмоқшаулаудың жоғары тиімділігін дәлелдейді және оны сейсмикалық тәуекелдерді төмендетудің қолжетімді әрі сенімді тәсілі ретінде инженерлік практикада қолдануға мүмкіндік береді.

Түйін сөздер: сейсмикалық әсерлер, топырақ, жасанды негіз, акселерограммалар, ғимараттардың динамикалық әсерді сезінуі, үдеуді төмендету.

Кіріспе

Жер сілкінісі табиғи апат ретінде бұрын болған аумақтарда уақыт пен қирау қарқындылығы жағынан белгісіздік жағдайында қайталану қасиетіне ие. Осыған байланысты бүкіл әлемде сейсмикалық тәуекелді төмендетудің басым бағыты ретінде ғимараттар мен имараттардың орнықтылығын арттыруға бағытталған сейсмикалық қорғау және сейсмооқшаулау жүйелерін, соның ішінде демпферлік құрылғыларды әзірлеу қарастырылады. Соңғы онжылдықтардағы жойқын жер сілкіністері, атап айтқанда Түркиядағы (2023 ж.) және Мьянмадағы (2025 ж.) жер сілкіністері, дәстүрлі сейсмотөзімді құрылыс тәсілдерінің конструкцияның сызықтық емес деформацияланатын топырақтық негізбен бірлескен жұмысын ескеретін тұрғыда елеулі қайта қарауды талап ететінін айқын көрсетті.

Соңғы жылдары сейсмикалық әсерлерді төмендетуге бағытталған геотехникалық сейсмооқшаулау (GSI) тұжырымдамасы белсенді түрде дамуда. Бұл жүйелер сейсмикалық толқындар құрылыс нысанының іргетасына жеткенге дейін оларды ішінара шағылыстыруға, жұтуға немесе түрлендіруге қабілетті. Hing Ho Tsang [1,2], Ivan Banović [3], Анастасиус [4], Xiong W., Tsang H.H. [5], Forcellini D. [6] еңбектерінде көрсетілгендей, геотехникалық сейсмооқшаулау жүйелері оларды орнату және пайдалану жағдайында жеткілікті сенімділік пен тиімділікке ие. Теориялық және эксперименттік зерттеулер GSI жүйелерінің тиімділігін олардың тік, көлбеу немесе көлденең орналасуына [7, 8, 9], тікбұрышты немесе дөңгелек пішініне, ғимараттан қашықтығына, сондай-ақ қалыңдығы мен орналастыру тереңдігіне байланысты екенін дәлелдеді [10, 11]. Іргетас астында әртүрлі геоматериалдарды, оның ішінде құм, қиыршық тас, тас малталарын [12,13], резеңке – топырақ қоспаларын (RSM) [14–21], геопенаны [22–24] және геосинтетикалық материалдарды [25,26] қолдану арқылы жүргізілген эксперименттік зерттеулер де GSI жүйелерінің сейсмикалық әсерлерді азайтудағы жұмысқа қабілеттілігін көрсетті.

Осы зерттеу әртүрлі геоматериалдардан жасалған топырақтық төсеніштер түріндегі геотехникалық сейсмооқшаулаудың тиімділігін эксперименттік және сандық модельдеу нәтижелеріне негізделген [25–29]. Жұмыстың негізгі мақсаты – топырақтық төсеніштер түріндегі геотехникалық сейсмооқшаулау қолданылған ғимараттардың сейсмикалық сенімділігін сандық модельдеу, сондай-ақ берілген қарқындылықтағы жер сілкіністері кезінде негіз деформациясының артуын және ғимараттың динамикалық сипатын ықтималдық тұрғыда бағалау болып табылады.

Сандық модельдеу геотехникалық сейсмооқшаулаудың (GSI) топырақтық төсеніштер түріндегі геометриялық және физика-механикалық параметрлерінің сейсмикалық әсер кезіндегі ғимараттардың динамикалық әсерді сезінуіне ықпалын анықтауға мүмкіндік береді. Сонымен қатар, берілген қарқындылықтағы әсерлер жағдайында ғимараттың динамикалық сипатын талдау барысында статистикалық біртекті еместік пен кездейсоқ әсерлерді ескеретін ықтималдық бағалау әдістері қолданылады.

Әдіснама

Зерттеу әдістері мыналарды қамтиды:

– топырақтық төсеніштер түріндегі геотехникалық сейсмооқшаулаудың негіздеріне теориялық талдау жүргізу және сейсмикалық қауіпсіздікті қамтамасыз етудің қолданыстағы тәсілдерін бағалау;

– PLAXIS 2D бағдарламалық кешені негізінде соңғы элементтер әдісімен берілген

қарқындылықтағы сейсмикалық әсерлер кезіндегі ғимараттардың динамикалық әсерді сезінуіне сандық модельдеу;

– топырақтық төсеніштер түріндегі геотехникалық сейсмоқорғаудың сенімділігін ықтималдық тұрғыда талдау және сейсмикалық әсерлер жағдайында ғимараттың динамикалық сипатын бағалау.

Сенімділікті бағалау бойынша модельдеу 4 кезеңде жүргізіледі:

1. Табиғи негіздің шөгуін есептеу және берілген қарқындылықтағы сейсмикалық әсерлер кезіндегі ғимараттың динамикалық әсерді сезінуін анықтау.

Мақсаты: табиғи негіздің көтергіш қабілетін, сондай-ақ іргетас деңгейінде және ғимараттың жоғарғы нүктесінде пайда болатын динамикалық үдеулерді анықтау.

2. Қалыңдығы 3 м ірі түйіршікті құмнан жасалған топырақтық төсеніштер түріндегі сейсмоқорғаудың статикалық және динамикалық сипаттамаларын зерттеу. Мақсаты: ірі түйіршікті құмнан жасалған топырақтық төсеніштің көтергіш қабілетін және берілген әсерлер кезіндегі ғимараттың динамикалық сипатын анықтау.

3. Геоторлы қабаты бар ірі түйіршікті құмнан жасалған топырақтық төсеніштер түріндегі сейсмоқорғау жағдайында ғимараттың динамикалық сипаттамаларын зерттеу.

Мақсаты: геотор қабаты бар ірі түйіршікті құмнан жасалған топырақтық төсеніштер түріндегі ғимараттың көтергіш қабілетін және берілген қарқындылықтағы сейсмикалық әсерлер кезіндегі динамикалық әсерді сезінуін анықтау.

4. Модельдеу нәтижелері бойынша алынған орташа мәндер төңірегіндегі ықтималдықтардың нормаль таралуына негізделген топырақтық төсеніштер түріндегі сейсмоқорғаудың сенімділігін талдау.

Мақсаты: шекті жағдайлардың нормативтік критерийлерінен асу ықтималдықтарын және сенімділік коэффициенттерін анықтау. Мұндай тәсіл есептеу үдерісіне кездейсоқ факторларды енгізуге, әртүрлі шекті жағдайларды тәуекел деңгейі бойынша салыстыруға, сондай-ақ мақсатты сенімділік деңгейіне сүйене отырып нормативтік қауіпсіздік коэффициенттерін калибрлеуге мүмкіндік береді.

Нәтижелер мен талқылау

Ғимараттың сейсмикалық әсерлерге сезінуін анықтау әдістемесі модельдеу деректері бойынша алынған орташа мәндер айналасындағы ықтималдықтардың нормаль таралуына негізделеді. Құрылым шөгуінің шекті мәнінен асу ықтималдығы келесі өрнек арқылы анықталады:

$$P(s > s_{lim}) = 1 - \Phi\left(\frac{s_{lim} - \mu(s)}{\sigma_s}\right) \quad (1)$$

мұндағы, $\mu(s)$ – шөгудің орташа мәні, σ_s – стандарттық ауытқу, s_{lim} – шөгудің шекті рұқсат етілген мәні, Φ – стандартты нормаль үлестірім функциясы. Шөгу бойынша сәйкес сенімділік коэффициенті келесі өрнекпен анықталады:

$$\beta_s = \frac{s_{lim} - \mu(s)}{\sigma_s} \quad (2)$$

Ұқсас түрде сейсмикалық әсер кезінде іргетас деңгейінде және ғимараттың жоғарғы

нүктесінде рұқсат етілген үдеудің асып кетуі критерийі бойынша істен шығу ықтималдығы анықталады:

$$P_f(a_{fund} > a_{lim}) = 1 - \Phi\left(\frac{a_{lim} - \mu(a_{fund})}{\sigma_{af}}\right) \quad (3)$$

мұндағы, $\mu(a_{fund})$ және σ_{af} – негіздегі тік үдеудің орташа мәні мен стандарттық ауытқуы, a_{lim} – үдеудің рұқсат етілген нормативтік мәні.

Осы критерийге сәйкес келетін сенімділік коэффициенті келесі түрде анықталады:

$$\beta_{af} = \frac{a_{lim} - \mu(a_{fund})}{\sigma_{af}} \quad (4)$$

Материалдар. Модельдеу үшін Қызылорда қаласындағы нақты 10 қабатты ғимараттың деректері қолданылды. Ғимараттың жоспарда өлшемдері 15,5×27 м, биіктігі 39 м. Конструктивтік сұлбасы – қаңқалы-байланысты жүйе (қаттылық диафрагмалары бар монолитті қаңқа). Іргетасы – қалыңдығы 1,0 м плиталық іргетас, бетон класы В25.

Құрылыс алаңының геологиялық қимасы: қалыңдығы 3 м-ге дейінгі үйінді топырақ және төменгі қабат – қалыңдығы 12 м-ге дейінгі орташа тығыздықтағы ұсақ құм. Деформация модулі $E = 19,9$ МПа, тығыздығы $1,88$ г/см³.

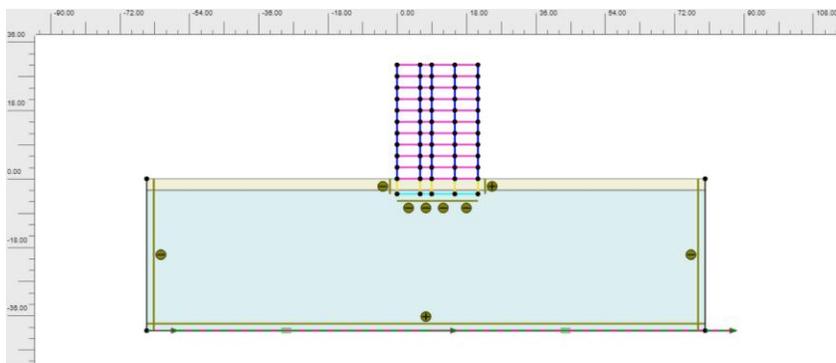
Есептік топырақ массиві орталық аймақта ғимараттың динамикалық сипатына есептік аймақ шекараларынан шағылған толқындардың әсерін болдырмау мақсатында ені 150 м және тереңдігі 40 м болып қабылданды.

Есептік сейсмикалық әсер 0,25g, әсер ету ұзақтығы – 20 с. Бұл әсер Кобе жер сілкінісінің (1995 ж., магнитудасы 6,9, Рихтер шкаласы бойынша 7,3) акселерограммасы негізінде масштабталды.

Аталған жер сілкінісінің спектрлік деректері MSK-64 шкаласы бойынша 7–8 балл қарқындылығына тән сейсмикалық жүктеме жағдайларын жеткілікті деңгейде қайта өндіруге мүмкіндік береді.

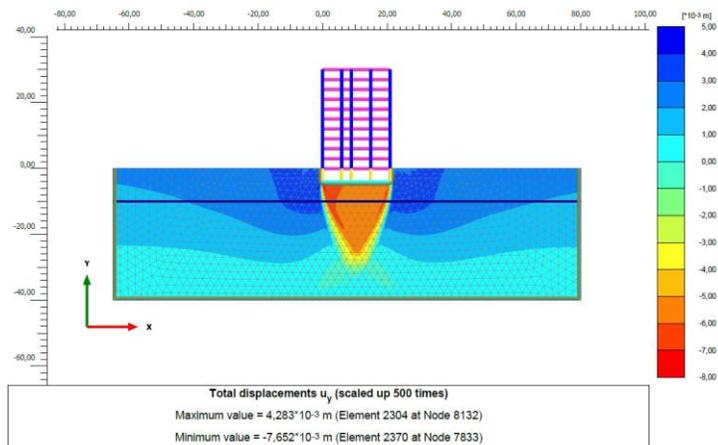
Модельдеу міндетін қою және нәтижелер

Міндет 1. Табиғи негіздің шөгуді есептеу және берілген сейсмикалық әсерлер кезінде (Кобе жер сілкінісінің акселерограммасы бойынша) іргетас деңгейінде және ғимараттың жоғарғы нүктесінде үдеулерді анықтау. Сондай-ақ, сейсмикалық әсерлер кезінде іргетасқа түсетін жүктеменің ықтимал артуын бағалау (1-3 суреттер).



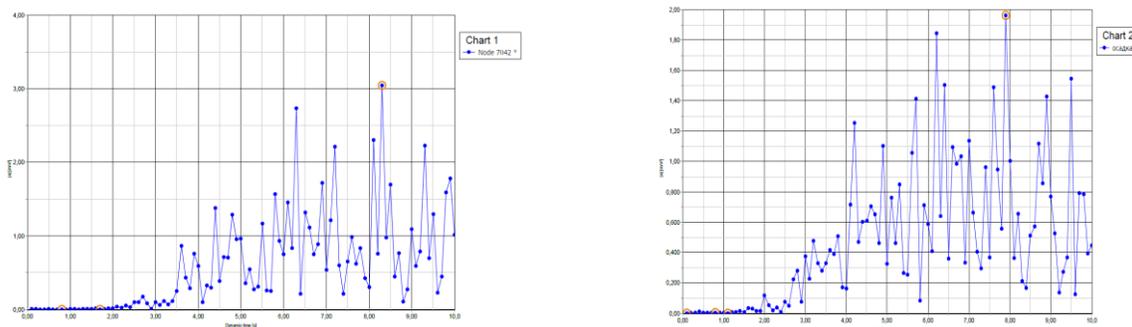
1-сурет. Ғимараттың жобалау схемасы

Ғимараттың жоғарғы нүктесіндегі үдеу іргетас деңгейіндегі мәннен 35% жоғары, бұл ғимараттың жалпы сенімділігіне әсер етуі мүмкін.



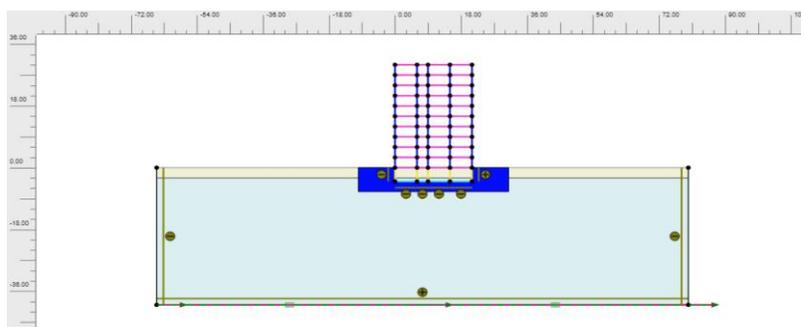
2-сурет. Іргетастың шөгюі (141 мм)

Есептік жүктеме әсерінен іргетастың шөгюі нормативтік мәндерден асып түседі.



3-сурет. Іргетас деңгейіндегі үдеу ($1,96 \text{ м/с}^2$) (а) және ғимараттың жоғарғы нүктесіндегі үдеу ($3,04 \text{ м/с}^2$) (б)

Міндет 2. Қалыңдығы 3 м ірі түйіршікті құмнан жасалған топырақтық төсеніштер түріндегі сейсмоқшаулаудың статикалық және динамикалық сипаттамаларын зерттеу, топырақты төсеніштер ауданы ғимарат өлшемі А-ға қатысты 1,5А-ға тең (4–7 суреттер).

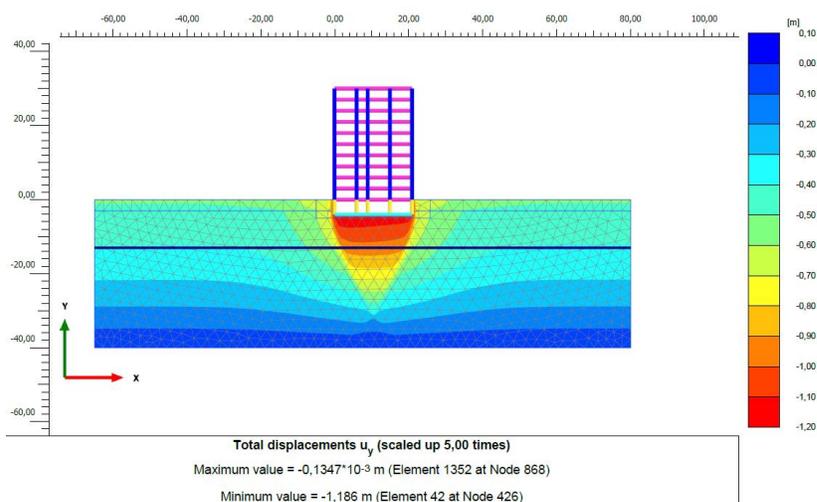


4-сурет. Ғимараттың жобалау схемасы (ірі түйіршікті құм)

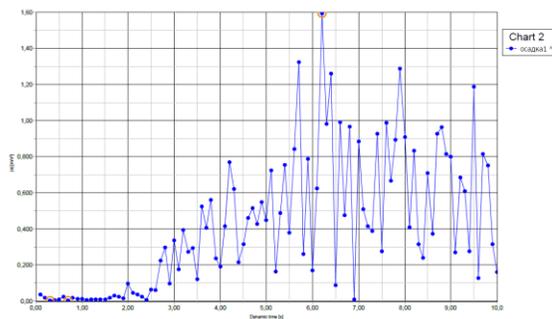
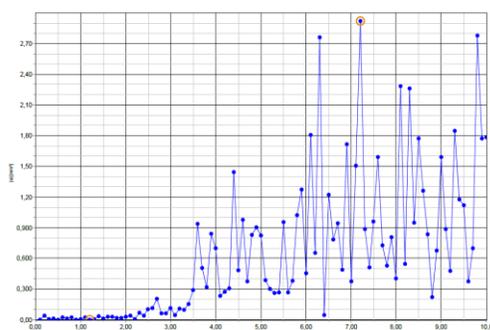
Міндет 3. Геотор қабаты бар топырақтық төсеніштер түріндегі сейсмооқшаулау қолданылған жағдайда ғимараттың динамикалық әсерді сезінуін зерттеу.

Property	Unit	Value
Stiffness		
E'	kN/m ²	45,00E3
ν' (nu)		0,3000
Alternatives		
G	kN/m ²	17,31E3
E _{oed}	kN/m ²	60,58E3
Strength		
c _{ref}	kN/m ²	0,000
ϕ' (phi)	°	30,00
ψ (psi)	°	0,000
Velocities		
V _s	m/s	92,14
V _p	m/s	172,4

5-сурет. Құмның физика-механикалық сипаттамалары

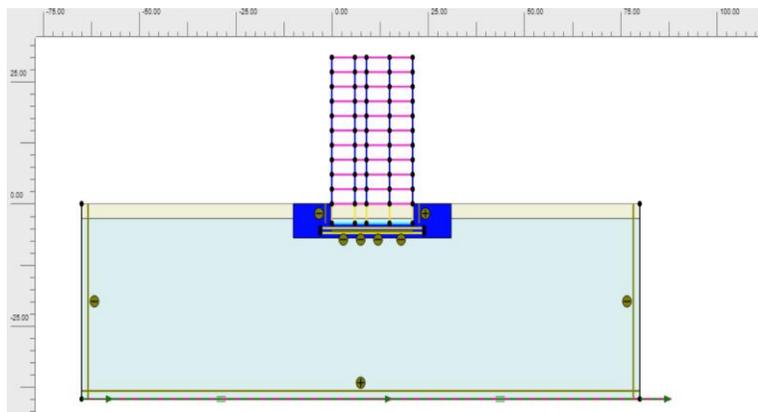


6-сурет. Іргетастың шөгуі (-129 мм) (ірі түйіршікті құм)

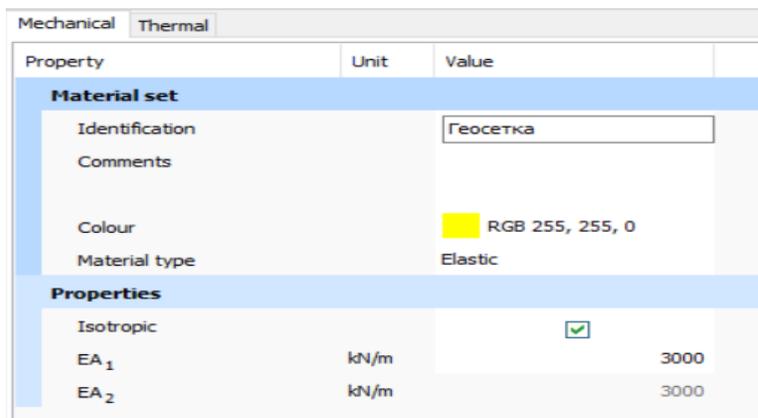


7-сурет. іргетас деңгейіндегі үдеу (1,595 м/с²) (а) және ғимараттың жоғарғы нүктесіндегі үдеу (2,922 м/с²) (б).

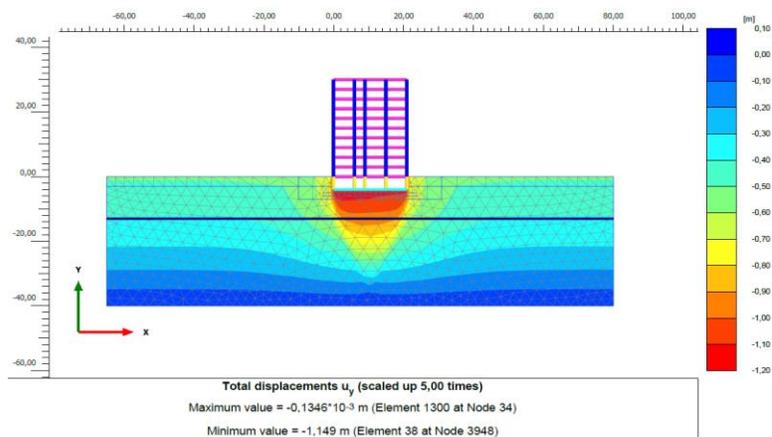
Бұл ретте биіктігі 2 м болатын ірі түйіршікті құмнан жасалған топырақтық төсеніштерде 1 м тереңдікте орналасқан геотор қабаты бар сейсмооқшаулау нұсқасы қарастырылды (8 – 11суреттер).



8-сурет. Ғимараттың жобалау схемасы (геотор қабаттары бар ірі түйіршікті құм)

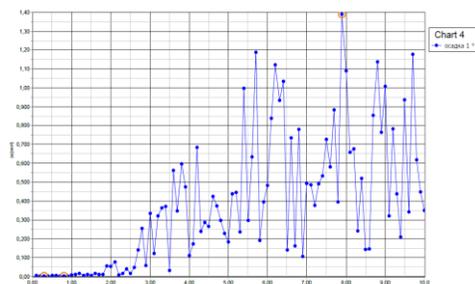
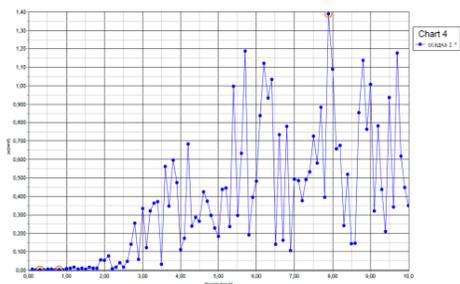


9-сурет. Геоторлардың сипаттамалары



10-сурет. Іргетастың шөгуі (-114 мм) (геотор қабаттары бар ірі түйіршікті құм)

Геотор қабаты бар топырақтық төсеніштер түріндегі сейсмоқшаулау қолданылған жағдайда іргетастың шөгуі геоторсыз нұсқамен салыстырғанда 10 %-ға аз.



11-сурет. Іргетас деңгейіндегі үдеу ($1,389 \text{ м/с}^2$) (а) және ғимараттың жоғарғы нүктесіндегі үдеу ($2,585 \text{ м/с}^2$) (б)

Геотор қабаты бар негізде де үдеудің төмендеуі байқалады.

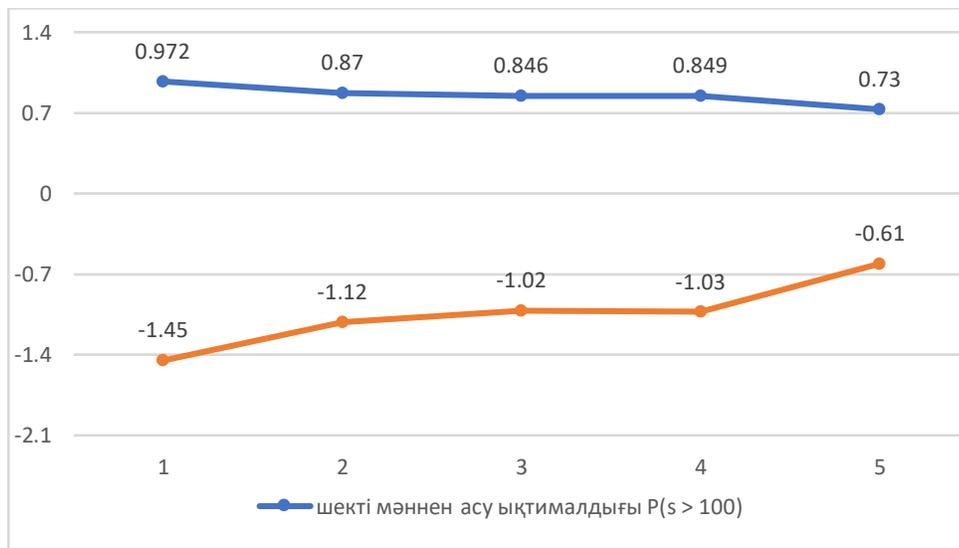
1-кесте. Әртүрлі негіз түрлері жағдайында ғимарат конструкциясының сенімділігін ықтималдық тұрғыда бағалау параметрлері

Нұсқалар	$\mu(s)$, мм	σ_{μ} , мм	$P(s>100)$	β_{μ}	$\mu(a_{fund})$, м/с^2	σ_{af}	$P_f(a_{fund}>2,5)$	β_{af}
Сейсмоқшаулаусыз	141	28,2	92,7 %	-1,45	1,960	0,490	13,52 %	1,10
Сейсмоқшаулау – құм (h = 3,0 м)	129	25,8	87 %	-1,12	1,595	0,399	1,16 %	2,27
Сейсмоқшаулау – құм + 2×геотор (h = 3,0 м)	114	22,8	73 %	- 0,61	1,389	0,347	0,069 %	3,20

2-кесте. Конструкцияның жоғарғы бөлігінде әртүрлі негіз түрлері жағдайында ғимарат конструкциясының сенімділігін ықтималдық тұрғыда бағалау параметрлері.

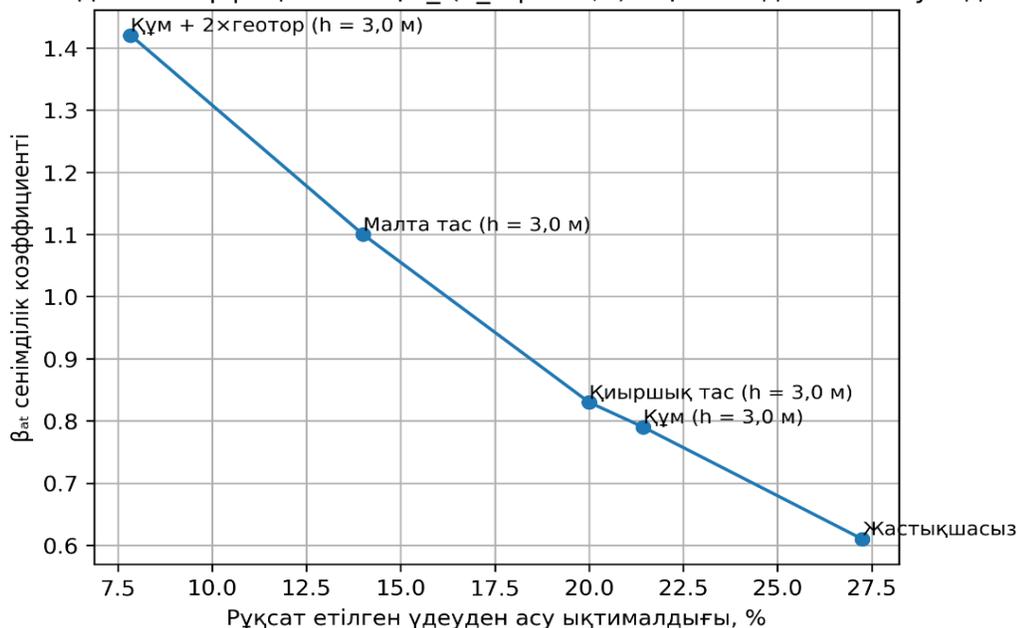
Нұсқалар	$\mu(a_{top})$, м/с^2	σ_{at}	$P_f(a_{top}>3,5)$	β_{at}
Төсенішсіз	3,040	0,760	27,25 %	0,61
Құм (h = 3,0 м)	2,922	0,731	21,44 %	0,79
Құм + 2×геотор (h = 3,0 м)	2,585	0,646	7,84 %	1,42

Әртүрлі негіз түрлерімен және конструкцияның жоғарғы бөлігінде әртүрлі негіз түрлері жағдайында ғимарат конструкциясының сенімділігін ықтималдық тұрғыда бағалау параметрлері төмендегі 1 және 2 кестелерде берілген.



12-сурет. Шөгу бойынша сенімділік коэффициенттері мен шекті мәннен асу ықтималдықтарының графигі

β_{at} сенімділік коэффициентінің $P_f(a_{top} > 3,5)$ ықтималдығына тәуелділігі



13-сурет. Конструкцияның жоғарғы бөлігіндегі үдеу бойынша сенімділік коэффициенттері және рұқсат етілген үдеуден асу ықтималдықтарының графигі

Іргетастың шөгуі бойынша жүргізілген сандық модельдеу нәтижелері (2-сурет және 6-сурет) берілген ғимарат үшін топырақтық төсеніштер түріндегі сейсмооқшаулаудың оңтайлы қалыңдығы 3,0 м шамасында екенін көрсетеді. Бұл жағдайда іргетастың шөгуі аталған жоба үшін белгіленген нормативтік талаптардан аспайды.

10-суреттен көрінгендей, топырақтық төсеніштер түріндегі сейсмооқшаулау қолданылған іргетас негізінің көтергіш қабілеті геотор қабаты жоқ нұсқамен салыстырғанда 20 %-ға артқан. Сонымен қатар, геотор қабаты бар сейсмооқшаулау жағдайында іргетастың шөгуі геоторсыз нұсқамен салыстырғанда 20 %-ға азайған.

Топырақтық төсеніштер түріндегі сейсмооқшаулаудың ғимараттың сейсмикалық сезінуі әсерін зерттеу нәтижелері, яғни іргетас деңгейінде және ғимараттың жоғарғы нүктесінде үдеулерді өлшеу, сейсмооқшаулаудың қалыңдығы артқан сайын іргетас деңгейіндегі үдеулердің айтарлықтай төмендейтінін көрсетеді (13-сурет). Сонымен қатар, ғимараттың жоғарғы нүктесінде орын ауыстырулар мен үдеу мәндерінің аз болуы байқалады. Бұл топырақ тербелістерінің ғимаратқа берілуі барысында энергияның бір бөлігі пластикалық сипатымен сипатталатын конструктивтік жүйе арқылы жұтылуымен түсіндірілуі мүмкін.

Қорытынды

Конструкция, негіз және топырақтық төсеніштер түріндегі сейсмооқшаулау өзара әрекеттесуін сандық модельдеу нәтижелері геотехникалық сейсмооқшаулауды (GSI) дамыту үшін негіз бола алады. Сандық модельдеу талдауы қалыңдығы 3,0 м-ге дейінгі топырақтық төсеніштің деформацияларды оқшаулау қабатының шегінде локализациялауға мүмкіндік беретінін және ғимараттың жоғарғы нүктесіндегі үдеудің жоғары мәні (PGA) 30–40 %-ға төмендететінін көрсетті.

Зерттеу нәтижелері құм – қиыршықтас қоспасын және геосинтетикалық қабаттарды қамтитын аралас шешімдердің ең жоғары тиімділік көрсететінін анықтады. Сейсмооқшаулаудың сенімділігін модельдеу нәтижелері бойынша алынған орташа мәндер төңірегіндегі ықтималдықтардың қалыпты таралуына негізделген есептеу берілген қарқындылықтағы жер сілкіністері кезінде шекті жағдайлардың нормативтік критерийлерінен асу ықтималдықтарын және сенімділік коэффициенттерін сандық тұрғыда бағалауға мүмкіндік береді.

Ғимараттар үшін геотехникалық сейсмооқшаулауды (GSI) сандық модельдеу нәтижелері топырақтық төсеніштер түріндегі сейсмооқшаулау тәсілінің жоғары тиімділігін растайды және оны сейсмикалық тәуекелдерден қорғаудың қолжетімді, сенімді әрі бейімделгіш технологиясы ретінде қазіргі инженерлік практикада қолдануға болатынын дәлелдейді.

Зерттеудің практикалық маңыздылығы ұсынылған шешімдердің әртүрлі геотехникалық жағдайлары бар жобаларға интеграциялану мүмкіндігімен айқындалады.

Авторлардың қосқан үлесі

Е. Бесимбаев- Зерттеу жұмысының тұжырымдамасын әзірлеуге және ғылыми бағытын айқындауға жетекшілік жасады.

С. Ниетбай-Зерттеудің әдіснамасын әзірлеу, сандық модельдеуді орындау және есептеу нәтижелерін талдауға қатысты.

Р. Шегенбаев- Теориялық талдау жүргізу, бастапқы материалдарды жинау және

мақаланың бастапқы нұсқасын дайындау жұмыстарын орындады.

А. Шадкам-Сандық модельдеу нәтижелерін өңдеу, деректерді жүйелеу, графиктер мен иллюстрациялық материалдарды дайындау жұмыстарына қатысты. Мақаланың ғылыми редакциясы мен мазмұнын жетілдіру жұмыстары

Әдебиеттер тізімі

1. Ахметжанова С.Б. Қазақстандағы жоғары білім: даму мәселелері мен перспективалары // *Л.Н. Гумилев атындағы ЕҰУ хабаршысы. Химия. География. Экология сериясы.* – 2016. – № 5. – Б. 10–18.
2. Tsang H.H. Analytical design models for geotechnical seismic isolation systems // *Bulletin of Earthquake Engineering.* – 2023. – Vol. 21. – P. 3881–3904. – <https://doi.org/10.1007/s10518-022-01469-x>
3. Tsang H.H., Pitilakis K. Mechanism of geotechnical seismic isolation system: analytical modeling // *Soil Dynamics and Earthquake Engineering.* – 2019. – Vol. 122. – P. 171–184. – <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2019.03.037>
4. Banović I., Radnić J., Grgić N. Foundation size effect on the efficiency of seismic base isolation using a layer of stone pebbles // *Earthquakes and Structures.* – 2020. – Vol. 19, No. 2. – P. 103–116. – <https://doi.org/10.12989/eas.2020.19.2.103>
5. Tsiavos A., Haladij P., Sextos A., Alexander N.A. Analytical investigation of the effect of a deformable sliding layer on the dynamic response of seismically isolated structures // *Structures.* – 2020. – <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.08.016>
6. Xiong W., Tsang H.H., Lo S.H., Shang S.P., Wang H.D., Zhou F.Y. Geotechnical seismic isolation system — experimental study // *Advanced Materials Research.* – 2011. – Vol. 163–167. – P. 4451–4455. – <https://www.scientific.net/AMR.163-167.4449>
7. Forcellini D. Assessment of geotechnical seismic isolation (GSI) as a mitigation technique for seismic hazard events // *Geosciences.* – 2020. – Vol. 10, No. 6. – Art. 222. – <https://doi.org/10.3390/geosciences10060222>
8. Ильичев В.А. К оценке коэффициента демпфирования основания фундаментов, совершающих вертикальные колебания // *Основания, фундаменты и механика грунтов.* – 1981. – № 4. – С. 22–26.
9. Bessimbayev E., Zhambakina Zh., Niyetbay S. Ensuring the seismic safety of a building using a geotechnical seismic isolating screen // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies.* – 2022. – Vol. 3, No. 7(117). – P. 59–67. – <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.260035>
10. Orekhov V.V., Negahdar H. Efficiency of trench barriers used to protect structures from dynamic loads // *Vestnik MGSU.* – 2016. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/efficiency-of-trench-barriers-used-to-protect-structures-from-dynamic-loads-and-studyof-the-stress-strain-state-of-soils-based-on-strain-1> (дата обращения: 05.01.2026).
11. Jauhari N., Hedge A. Performance evaluation of single and multiple trenches in screening ground vibrations // *Soil Dynamics, Earthquake and Computational Geotechnical Engineering.* – Singapore: Springer, 2022. – P. 335–345. – https://doi.org/10.1007/978-981-19-6998-0_29
12. Bessimbayev Y., Shadkam A., Begaliev U., Begentayev M., Suleyev D., Zhumadilova Z.,

- Irgibayev T., Ussipbekov Y. Development of geotechnical seismic isolation system in the form of vertical barriers // *Buildings*. – 2024. – Vol. 14, No. 9. – Art. 2736. – <https://doi.org/10.3390/buildings14092736>
13. Banović I., Radnić J., Grgić N. Numerical model for dynamic analysis of structures with seismic base isolation using a layer of stone pebbles // *Ingegneria Sismica*. – 2018. – URL: <https://ingegneriasismica.com/2021/vol-38-issue-1/numerical-model-for-dynamic-analysis-of-structures-with-seismic-base-isolation-using-a-layer-of-stone-pebbles/>
 14. Pitilakis K., Trevlopoulos K., Anastasiadis A., Senetakis K. Seismic response of structures on improved soil // *Proceedings of the 8th International Conference on Structural Dynamics*. – Leuven, Belgium, 2011.
 15. Tsiavos A., Alexander N.A., Diambra A., Ibraim E., Vardanega P.J., Gonzalez-Buelga A., Sextos A. A sand-rubber deformable granular layer as a low-cost seismic isolation strategy // *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. – 2019. – Vol. 125. – Art. 105731. – <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2019.105731>
 16. Pitilakis K. et al. Numerical investigation of the seismic response of RC buildings on soil replaced with rubber-sand mixtures // *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. – 2015. – Vol. 79. – P. 237–252.
 17. Brunet S., de la Llera J.C., Kausel E. Non-linear modeling of seismic isolation systems made of recycled tire-rubber // *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. – 2016. – Vol. 85. – P. 134–145.
 18. Hazarika H. Structural stability during earthquakes using tyres // *Proceedings of IW-TDGM*. – Yokosuka, Japan, 2008.
 19. Pistolas G.A., Pitilakis K., Anastasiadis A. Seismic isolation potential of rubber/soil mixtures // *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*. – 2020. – Vol. 19. – P. 683–704.
 20. Senetakis K., Anastasiadis A., Pitilakis K. Dynamic properties of sand/rubber mixtures // *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. – 2012. – Vol. 33, No. 1. – P. 38–53.
 21. Feng Z.Y., Sutter K.G. Dynamic properties of granulated rubber/sand mixtures // *Geotechnical Testing Journal*. – 2000. – Vol. 23, No. 3. – P. 338–344.
 22. Karatzia X., Mylonakis G. Geotechnical isolation of pile-supported bridge piers using EPS geofoam // *Proceedings of the 16th World Conference on Earthquake Engineering*. – Santiago, Chile, 2017.
 23. Mehran N., Martin Z., Raul F. Vibration screening in layered soil by geofoam-filled barrier // *HAL Open Science*. – 2023. – URL: <https://hal.science/hal-04155034>
 24. Amato L., Flora A., Bilotta E., Nappa V. Field trials on soft grouting barriers // *ISSMGE*. – 2017. – URL: <https://www.issmge.org/publications/publication/field-trials-on-soft-grouting-barriers-to-mitigate-vibrations-effects>
 25. Yegian M.K., Lahlaf A.M. Dynamic interface shear strength of geomembranes // *Journal of Geotechnical Engineering*. – 1992. – Vol. 118, No. 5. – P. 760–779.
 26. Yegian M.K., Kadakal U. Foundation isolation using a smooth synthetic liner // *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. – 2004. – Vol. 130, No. 11. – P. 1121–1130.
 27. Banović I., Radnić J., Grgić N., Matešan D. Use of limestone sand for seismic isolation of foundations. – 2018. – <https://doi.org/10.1155/2018/9734283>
 28. Zhang H. et al. Marine sand cushion-based geotechnical seismic isolation system // *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. – 2023. – <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2023.107854>

29. Хасанов Н.Н., Бай В.Ф., Рабиев К.Р. Проектирование и устройство оснований с помощью грунтоизвестковых подушек // *Инженерный вестник Дона*. – 2022. – № 2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/proektirovaniya-i-ustroystvo-osnovaniy-i-s-pomoschyu-gruntoizvestkovyh-podushek/viewer>

R. Shegenbayeva¹, Y. Bessimbayev², A. Shadkam², S. Niyetbay^{*2,3,4}

¹*Korkyt Ata Kyzylorda University, Kyzylorda, Kazakhstan;*

²*Satbayev University, 22 Satbayev Street, Almaty, Kazakhstan; School of*

³*Construction, International Educational Corporation, Almaty, Kazakhstan;*

⁴*LLP Kazakh Leading Academy of Architecture and Civil Engineering, Almaty, Kazakhstan*

Reliability of Geotechnical Seismic Isolation (GSI) for Reducing Earthquake Effects

Abstract. The article investigates the interaction between soil cushion-based geotechnical seismic isolation, the foundation, and the superstructure with the aim of improving the reliability and stability of buildings located in seismically hazardous regions. The main objective of the study is the numerical modeling of the seismic reliability of buildings equipped with geotechnical seismic isolation in the form of soil cushions, as well as the probabilistic assessment of foundation deformation growth and the dynamic response of the structure under earthquakes of a given intensity. The research methodology includes theoretical analysis, numerical modeling using the finite element method implemented in PLAXIS 2D, interpretation of the obtained results, and reliability assessment based on probabilistic methods that account for statistical heterogeneity and random effects. Probabilistic analysis indicates that the probability of exceeding the allowable acceleration at the top of the building decreases from 27% to 7.84%, while the reliability index increases to $\beta_{at} = 1.42$ (a 73% improvement). These findings confirm the high efficiency of soil cushion-based geotechnical seismic isolation and demonstrate its potential for practical application as an affordable, reliable, and adaptable solution for reducing seismic risk in engineering practice.

Keywords: seismic effects, soils, artificial foundation, accelerograms, dynamic response of buildings, acceleration reduction.

Р. Шегенбаева¹, Е. Бесимбаев², А. Шадкам², С. Ниятбай^{*2,3,4}

¹*Кызылординский университет имени Коркыт Ата, Кызылорда, Казахстан*

²*Казахский национальный исследовательский технический университет, Алматы, Казахстан*

³*Международная образовательная корпорация, Алматы, Казахстан*

⁴*ТОО «Казахская головная архитектурно-строительная академия», Алматы, Казахстан*

Надежность геотехнической сейсмоизоляции (gsi) для снижения воздействий землетрясения

Аннотация. Статья посвящена исследованию взаимодействия геотехнической

сейсмоизоляции в виде грунтовых подушек, основания и надземной части сооружения с целью повышения надёжности и устойчивости зданий, расположенных в сеймоопасных районах. Целью исследования является численное моделирование сейсмической надёжности зданий с геотехнической сейсмоизоляцией в виде грунтовых подушек, а также вероятностная оценка увеличения деформаций основания и динамических характеристик здания при землетрясениях заданной интенсивности. В работе исследована эффективность систем сейсмоизоляции в виде грунтовых подушек, выполненных из песка, щебня, а также песка, армированного геосеткой. Определены показатели надёжности по осадке основания, а также вероятности превышения допустимых ускорений на уровне фундамента и в верхней части здания. Результаты анализа показали, что применение геотехнической сейсмоизоляции (GSI) приводит к снижению горизонтальных ускорений на уровне подошвы фундамента и в верхней точке здания примерно на 16 %. Вероятностная оценка показала, что вероятность превышения допустимого ускорения в верхней части здания снижается с 27 % до 7,84 %, при этом коэффициент надёжности возрастает до $\beta_{at} = 1,42$ (увеличение на 73 %). Полученные результаты подтверждают высокую эффективность геотехнической сейсмоизоляции в виде грунтовых подушек и обосновывают возможность её применения в современной инженерной практике как доступного, надёжного и адаптивного метода снижения сейсмических рисков.

Ключевые слова: сейсмические воздействия, грунты, искусственное основание, акселерограммы, динамический отклик зданий, снижение ускорения.

References

1. Ahmetzhanova S.B. Vysshee obrazovanie v Kazahstane: problemy i perspektivy razvitiya [Higher Education in Kazakhstan: Problems and Prospects of Development] Vestnik ENU im. L.N. Gumileva. Seriya Himiya. Geografiya. Ekologiya [BULLETIN of the L.N. Gumilyov Eurasian National University. Chemistry. Geography. Ecology Series]». 5. 10-18(2016), <https://doi.org/10.32523/2789-4320-2024-1-x-x>. [Ресейде]
2. Tsang H.H. Analytical design models for geotechnical seismic isolation systems // *Bulletin of Earthquake Engineering*. – 2023. – Vol. 21. – P. 3881–3904. – <https://doi.org/10.1007/s10518-022-01469-x>
3. Tsang H.H., Pitilakis K. Mechanism of geotechnical seismic isolation system: analytical modeling // *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. – 2019. – Vol. 122. – P. 171–184. – <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2019.03.037>
4. Banović I., Radnić J., Grgić N. Foundation size effect on the efficiency of seismic base isolation using a layer of stone pebbles // *Earthquakes and Structures*. – 2020. – Vol. 19, No. 2. – P. 103–116. – <https://doi.org/10.12989/eas.2020.19.2.103>
5. Tsiavos A., Haladij P., Sextos A., Alexander N.A. Analytical investigation of the effect of a deformable sliding layer on the dynamic response of seismically isolated structures // *Structures*. – 2020. – <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.08.016>
6. Xiong W., Tsang H.H., Lo S.H., Shang S.P., Wang H.D., Zhou F.Y. Geotechnical seismic isolation system — experimental study // *Advanced Materials Research*. – 2011. – Vol. 163–167. – P. 4451–4455. – <https://www.scientific.net/AMR.163-167.4449>

7. Forcellini D. Assessment of geotechnical seismic isolation (GSI) as a mitigation technique for seismic hazard events // *Geosciences*. – 2020. – Vol. 10, No. 6. – Art. 222. – <https://doi.org/10.3390/geosciences10060222>
8. Il'ichev V.A. K otsenke koeffitsienta dempfirovaniya osnovaniya fundamentov, sovershayushchikh vertikal'nye kolebaniya [On the evaluation of the damping coefficient of foundation bases subjected to vertical vibrations] *Osnovaniya, fundamenti i mekhanika gruntov* [Soil Mechanics and Foundation Engineering]. 4. 22–26 (1981).
9. Bessimbayev E., Zhambakina Zh., Niyetbay S. Ensuring the seismic safety of a building using a geotechnical seismic isolating screen // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2022. – Vol. 3, No. 7(117). – P. 59–67. – <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.260035>
10. Orekhov V.V., Negahdar H. Efficiency of trench barriers used to protect structures from dynamic loads // *Vestnik MGSU*. – 2016. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/efficiency-of-trench-barriers-used-to-protect-structures-from-dynamic-loads-and-studyof-the-stress-strain-state-of-soils-based-on-strain-1> (дата обращения: 05.01.2026).
11. Jauhari N., Hedge A. Performance evaluation of single and multiple trenches in screening ground vibrations // *Soil Dynamics, Earthquake and Computational Geotechnical Engineering*. – Singapore: Springer, 2022. – P. 335–345. – https://doi.org/10.1007/978-981-19-6998-0_29
12. Bessimbayev Y., Shadkam A., Begaliev U., Begentayev M., Suleyev D., Zhumadilova Z., Irgibayev T., Ussipbekov Y. Development of geotechnical seismic isolation system in the form of vertical barriers // *Buildings*. – 2024. – Vol. 14, No. 9. – Art. 2736. – <https://doi.org/10.3390/buildings14092736>
13. Banović I., Radnić J., Grgić N. Numerical model for dynamic analysis of structures with seismic base isolation using a layer of stone pebbles // *Ingegneria Sismica*. – 2018. – URL: <https://ingegneriasismica.com/2021/vol-38-issue-1/numerical-model-for-dynamic-analysis-of-structures-with-seismic-base-isolation-using-a-layer-of-stone-pebbles/>
14. Ptilakis K., Trevlopoulos K., Anastasiadis A., Senetakis K. Seismic response of structures on improved soil // *Proceedings of the 8th International Conference on Structural Dynamics*. – Leuven, Belgium, 2011.
15. Tsiavos A., Alexander N.A., Diambra A., Ibrahim E., Vardanega P.J., Gonzalez-Buelga A., Sextos A. A sand–rubber deformable granular layer as a low-cost seismic isolation strategy // *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. – 2019. – Vol. 125. – Art. 105731. – <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2019.105731>
16. Ptilakis K. et al. Numerical investigation of the seismic response of RC buildings on soil replaced with rubber–sand mixtures // *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. – 2015. – Vol. 79. – P. 237–252.
17. Brunet S., de la Llera J.C., Kausel E. Non-linear modeling of seismic isolation systems made of recycled tire-rubber // *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. – 2016. – Vol. 85. – P. 134–145.

18. Hazarika H. Structural stability during earthquakes using tyres // *Proceedings of IW-TDGM*. – Yokosuka, Japan, 2008.
19. Pistolas G.A., Pitilakis K., Anastasiadis A. Seismic isolation potential of rubber/soil mixtures // *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*. – 2020. – Vol. 19. – P. 683–704.
20. Senetakis K., Anastasiadis A., Pitilakis K. Dynamic properties of sand/rubber mixtures // *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. – 2012. – Vol. 33, No. 1. – P. 38–53.
21. Feng Z.Y., Sutter K.G. Dynamic properties of granulated rubber/sand mixtures // *Geotechnical Testing Journal*. – 2000. – Vol. 23, No. 3. – P. 338–344.
22. Karatzia X., Mylonakis G. Geotechnical isolation of pile-supported bridge piers using EPS geofoam // *Proceedings of the 16th World Conference on Earthquake Engineering*. – Santiago, Chile, 2017.
23. Mehran N., Martin Z., Raul F. Vibration screening in layered soil by geofoam-filled barrier // *HAL Open Science*. – 2023. – URL: <https://hal.science/hal-04155034>
24. Amato L., Flora A., Bilotta E., Nappa V. Field trials on soft grouting barriers // *ISSMGE*. – 2017. – URL: <https://www.issmge.org/publications/publication/field-trials-on-soft-grouting-barriers-to-mitigate-vibrations-effects>
25. Yegian M.K., Lahlaf A.M. Dynamic interface shear strength of geomembranes // *Journal of Geotechnical Engineering*. – 1992. – Vol. 118, No. 5. – P. 760–779.
26. Yegian M.K., Kadakal U. Foundation isolation using a smooth synthetic liner // *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. – 2004. – Vol. 130, No. 11. – P. 1121–1130.
27. Banović I., Radnić J., Grgić N., Matešan D. Use of limestone sand for seismic isolation of foundations. – 2018. – <https://doi.org/10.1155/2018/9734283>
28. Zhang H. et al. Marine sand cushion-based geotechnical seismic isolation system // *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. – 2023. – <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2023.107854>
29. Khasanov N.N., Bai V.F., Rabiev K.R. Proektirovanie i ustroystvo osnovanii s pomoshch'yu gruntoizvestkovykh podushek [Design and construction of foundations using soil–lime cushions] *Inzhenernyi vestnik Dona* [Engineering Bulletin of Don]. 2 (2022). Available at: [URL:https://cyberleninka.ru/article/n/proektirovaniya-i-ustroystvo-osnovaniy-i-s-pomoschyu-gruntoizvestkovykh-podushek/viewer](https://cyberleninka.ru/article/n/proektirovaniya-i-ustroystvo-osnovaniy-i-s-pomoschyu-gruntoizvestkovykh-podushek/viewer)

Сведения об авторах:

Шегенбаева Р.К. – докторант, старший преподаватель кафедры «Электроэнергетика и безопасность жизнедеятельности», Кызылординский университет имени Коркыт Ата, 120014, Кызылорда, Казахстан

Бесимбаев Е.Т. – д.т.н., ассоциированный профессор кафедры строительства и строительных материалов, института архитектуры и строительства, Казахский национальный исследовательский технический университет имени К. И. Сатпаева, ул. Сатпаева 22а, 050013, Алматы, Казахстан.

Шадкам А.С. – докторант, старший преподаватель кафедры строительства и строительных материалов, института архитектуры и строительства, Казахский национальный исследовательский технический университет имени К. И. Сатпаева, ул. Сатпаева 22а, 050013, Алматы, Казахстан.

Ниетбай С.Е. – PhD, ассоциированный профессор кафедры Проектирование зданий и сооружений, факультета общего строительства Международной образовательной корпорации, ул. Рыскулбекова 28, г. Алматы, 050043, Казахстан.

Шегенбаева Р.К. – докторант, «Электр энергетикасы және тіршілік қауіпсіздігі» кафедрасының аға оқытушысы, Қорқыт Ата атындағы Қызылорда университеті, 120014, Қызылорда, Қазақстан.

Бесимбаев Е.Т. – т.ғ.д., Сәулет және құрылыс институты, «Құрылыс және құрылыс материалдары» кафедрасының қауымдастырылған профессоры, Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті, Сәтбаев көш., 22а, 050013, Алматы, Қазақстан.

Шадкам А.С. – докторант, Сәулет және құрылыс институты, «Құрылыс және құрылыс материалдары» кафедрасының аға оқытушысы, Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті, Сәтбаев көш., 22а, 050013, Алматы, Қазақстан.

Ниетбай С.Е. – PhD, Халықаралық білім беру корпорациясы, Жалпы құрылыс факультеті, «Ғимараттар мен құрылыстарды жобалау» кафедрасының қауымдастырылған профессоры, Рысқұлбеков к-сі, 28, 050043, Алматы, Қазақстан.

Shegenbayeva R.K. – PhD candidate, Senior Lecturer, Department of Electric Power Engineering and Life Safety, Korkyt Ata Kyzylorda University, 120014, Kyzylorda, Kazakhstan.

Bessimbayev Y. – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Construction and Building Materials, Institute of Architecture and Construction, Satbayev University, Satpayev St. 22a, 050013, Almaty, Kazakhstan.

Shadkam A.S. – PhD candidate, Senior Lecturer, Department of *Construction and Building Materials*, Institute of Architecture and Construction, Satbayev University, 22a Satbayev St., 050013, Almaty, Kazakhstan.

Niyetbay S. – PhD, Associate Professor, Department of Building and Structure Design, Faculty of General Construction, International Educational Corporation, Ryskulbekov St. 28, 050043, Almaty, Kazakhstan



Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).



МРНТИ 67.07.01

Научная статья

<https://doi.org/10.32523/2616-7263-2026-154-1-66-83>

Мировой опыт и современные тенденции проектирования университетских кампусов.

М.Х.Батырова*  , Г.Д.Мауленова 

*Институт архитектуры и строительства им.Т. К. Басенова, Satbayev University,
Алматы, Казахстан*

E mail: batyrova.m@stud.satbayev.university, g.maulenova@satbayev.university

Аннотация. В данной статье исследуются международный опыт и современные тенденции проектирования университетских кампусов, акцентируя внимание на принципах формирования инновационных и многофункциональных образовательных пространств. Особое внимание уделяется трансформации университетских территорий в комплексные научно-образовательные экосистемы, объединяющие образовательную, исследовательскую, социальную и общественную функции. Проанализированы примеры ведущих мировых кампусов, таких как Центр Джеймса Х. Кларка в Стэнфорде, Инженерный комплекс Гарвардского университета в Олстоне, кампус CREATE в Сингапуре, CJ Blossom Park в Южной Корее и Сколковский институт науки и технологий в России. Рассмотрены ключевые архитектурно-планировочные решения, обеспечивающие пространственную гибкость, междисциплинарность, устойчивость и интеграцию кампусов в городскую среду. Особое внимание уделяется формированию общественных пространств, стимулирующих коммуникацию, совместную работу и научное взаимодействие между представителями различных областей знаний. Выявлены современные модели организации кампусных пространств, включающие открытые, адаптивные и экологичные решения. Результаты исследования демонстрируют необходимость перехода от традиционных монофункциональных структур к динамичным и интегрированным кампусным экосистемам, что является актуальным для архитектурно-градостроительного развития университетов Казахстана в контексте глобальных образовательных и научных вызовов.

Ключевые слова: архитектура, университетские кампусы, пространственная организация, гибкость, устойчивость, инновации.

Введение

Современные университетские кампусы во всем мире трансформируются в многофункциональные, инновационные и социально ориентированные пространства, интегрированные в городскую ткань и обеспечивающие не только образовательные, но и научные, технологические, культурные и предпринимательские функции. Это уже не просто учебные корпуса с общежитиями, а сложные экосистемы, формирующие креативную среду для студентов, преподавателей, исследователей и представителей индустрии. Кампусы становятся ключевыми точками роста на территории города, стимулируя развитие науки, образования и экономики знаний [1].

Проблема, с которой сталкивается Казахстан, заключается в том, что подавляющее большинство университетской инфраструктуры было сформировано в период, когда архитектурно-планировочные решения основывались на принципах замкнутых, монофункциональных пространств. Эти принципы предполагали жесткую иерархичную структуру кампусов, ориентированную исключительно на учебный процесс без должного внимания к интеграции с городской средой, цифровым технологиям, междисциплинарным форматам обучения и гибкости пространств [2]. Такая модель уже не отвечает современным образовательным и научным запросам и существенно ограничивает потенциал развития университетов.

В условиях стремительного развития технологий, цифровизации образования, внедрения новых форматов взаимодействия и мультидисциплинарного подхода, встает острая необходимость в пересмотре принципов формирования архитектурной концепции университетских кампусов в Казахстане [3,4]. Сегодня университеты не могут оставаться изолированными институтами. Они должны стать открытыми, динамичными и гибкими пространствами, способными быстро адаптироваться к изменениям в образовательной среде и научной повестке.

Актуальность исследования определяется необходимостью формирования в Казахстане новых архитектурных принципов, соответствующих мировым стандартам качества, инновационности и устойчивости. Для казахстанских мегаполисов особенно важно создавать кампусы, которые не только поддерживают высокий уровень образования и науки, но и становятся частью городского ландшафта, повышая его качество и функциональность. При этом необходимо учитывать особенности социально-культурного контекста, климатические условия, градостроительную структуру и стратегические цели развития высшего образования в стране.

Цель статьи - исследовать передовой международный опыт проектирования и современные тенденции проектирования университетских кампусов, а также выявить ключевые архитектурные принципы и подходы, определяющие их успешность и актуальность в контексте развития современной образовательной среды.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи исследования**:

1. Рассмотреть существующие международные модели университетских кампусов и провести их сравнительный анализ.
2. Выявить ключевые архитектурные тенденции и принципы формирования современных кампусов.
3. Изучить современные международные стандарты и престижные архитектурные премии, характеризующие успешные кампусы.
4. Проанализировать наиболее удачные примеры проектирования университетских

кампусов в аспектах гибкости пространства, энергоэффективности, цифровизации социальной интеграции.

5. Обобщить полученные данные и определить основные направления и перспективы развития архитектуры университетских кампусов в мировой практике.

Данная статья ориентирована на обобщение и систематизацию актуальных архитектурных подходов к формированию университетских кампусов нового поколения, которые способны стать точками роста для образовательной и научной системы Казахстана в XXI веке. Конечные выводы статьи могут быть полезны в качестве ориентира при обсуждении подходов к проектированию новых кампусов, реконструкции существующих объектов и формировании архитектурно-градостроительных стратегий в сфере высшего образования.

Методология

В данной статье был проведён обзор университетских кампусов, расположенных в различных географических регионах (США, Европа и Азия), с целью выявления современных архитектурных и планировочных подходов, соответствующих международным стандартам. Методологическая основа исследования строилась на всестороннем онлайн-анализе и отборе кампусов, получивших международное признание и архитектурные награды.

1. Анализ глобальных моделей и классификаций кампусов. На первом этапе были рассмотрены существующие типы, модели и классификации кампусов, сформировавшиеся в мировой практике. Это позволило очертить общее представление о разнообразии пространственных решений, степени автономности, типах застройки и формах взаимодействия кампусов с городской средой. В анализ включены англосаксонская, континентальная, американская, азиатская и спутниковая модели, каждая из которых иллюстрирует свой подход к архитектурной организации университетской среды.

2. Формирование выборки кампусов на основе международного признания. Выбор кампусов осуществлялся на основе международного признания, полученного в рамках престижных архитектурных премий и профессиональных рейтингов. В качестве основных ориентиров использовались:

–Премия "Лаборатория года" по стандартам SEFA (Scientific Equipment and Furniture Association), оценивающая инновации в проектировании научно-образовательных лабораторий [5];

–Архитектурная премия Prix Versailles, присуждаемая объектам за выдающееся архитектурное качество, эстетику и социальную значимость [6];

–Данные ведущих профессиональных платформ и рейтингов, таких как *World Architecture Festival*, RIBA, AIA, UI GreenMetric и другие. Опора на эти ресурсы позволила отобрать кампусы, отражающие современные архитектурные подходы, высокие стандарты устойчивости, комфортности и функционального зонирования.

3. Изучение профессиональных источников и экспертных обзоров. В рамках исследования были проанализированы материалы профессиональных публикаций, аналитических обзоров и рецензий, опубликованных на ведущих международных платформах. Использовались материалы таких источников, как ArchDaily, DesignBoom, Dezeen, а также аналитические данные рейтинга QS Best Student Cities и исследований UI GreenMetric. Это обеспечило всестороннее понимание современных тенденций в проектировании кампусных пространств и позволило соотнести архитектурные решения с

критериями качества образовательной среды, устойчивости и инновационности.

Такой подход дал возможность систематизировать лучшие мировые практики и выделить основные архитектурные принципы, применимые в современном проектировании университетских кампусов.

Ограничения исследования

При анализе мировых аналогов университетских кампусов с точки зрения принципов формирования архитектурного пространства и архитектурной идеи необходимо учитывать ряд ограничений, влияющих на интерпретацию результатов:

Ограниченность доступа к первичным источникам. В рамках онлайн-анализа использовались открытые источники, такие как официальные сайты университетов, публикации в профильных изданиях и обзоры проектов. Отсутствие возможности прямого взаимодействия с авторами проектов или физического присутствия на территории кампусов ограничивает глубину анализа и восприятие архитектурного пространства в реальном контексте.

Неоднородность представленных данных. Объем и степень детализации информации о концепциях и архитектурных решениях варьируются от проекта к проекту, что может создавать дисбаланс в сравнении кампусов и влиять на полноту анализа.

Культурно-контекстуальные различия. Архитектурные решения, признанные успешными в одном социокультурном и климатическом контексте, не всегда могут быть непосредственно перенесены в условия Казахстана без адаптации. Это ограничивает прямую применимость выявленных принципов.

Указанные ограничения подчеркивают необходимость дальнейших, более комплексных исследований, включающих, при возможности, полевые исследования и профессиональные интервью, а также углублённый сравнительный анализ, учитывающий национальные особенности архитектурного проектирования в сфере высшего образования.

1. Анализ глобальных моделей и классификаций кампусов.

На международной арене существует целый ряд моделей университетских кампусов, отличающихся по своему устройству, масштабам, степени автономности, взаимодействию с городом и образовательной политике [7]. Среди них можно выделить:

- Английскую модель, где университет и жилые колледжи образуют единую пространственную и социальную систему (Оксфорд, Кембридж).
- Французскую модель, при которой университет располагается в городской среде, а студенты проживают вне кампуса (Сорбонна).
- Американскую модель, ориентированную на высокоразвитую научно-исследовательскую и технологическую инфраструктуру (Гарвард, Йель).
- Юго-восточную модель, реализующуюся в форме университетских корпораций с территориальным единством и кооперацией между автономными кампусами (Сингапур, Корея, Китай) [7].
- Спутниковую модель, предполагающую размещение кампуса в пригороде, как отдельного филиала головного университета (Калифорнийский университет в Мерседе).

Помимо географических и культурных различий, кампусы могут быть классифицированы по нескольким ключевым параметрам: по типу (исследовательские, корпоративные, учебные, гибридные), по масштабу (от единичных зданий до многокомпонентных территориальных кластеров), по характеру размещения (городские и загородные), по направлению деятельности (прикладные, фундаментальные,

мультидисциплинарные) [8]. Такая типология позволяет выявить архитектурные и градостроительные принципы, соответствующие современным требованиям образовательной среды, и определить потенциал их применения в различных контекстах.

Для казахстанского контекста особый интерес представляет интегративный подход, предполагающий сочетание нескольких моделей — кампус как многофункциональное, открытое и технологичное пространство, органично встроенное в структуру города. Такой подход особенно актуален для крупных городов страны, таких как Астана, Алматы и Шымкент, где университеты могут стать частью научно-инновационных кластеров, объединяющих образовательные учреждения, исследовательские центры, стартап-хабы и промышленных партнёров [9]. Однако прежде чем переходить к адаптации таких решений, необходимо комплексно изучить мировой опыт, выявить устойчивые тенденции и сформировать архитектурное понимание ключевых принципов проектирования.

2. Примеры ведущих университетских кампусов с международным признанием

Центр Джеймса Х. Кларка, Стэнфордский университет, Стэнфорд, Калифорния (James H. Clark Center, Stanford University, Stanford, CA) (Рис. 1)

Заказчик - Университет Станфорд

Архитектор-дизайнер - Foster+Partners

Площадь 22 760 м²

Год реализации 2003 г.

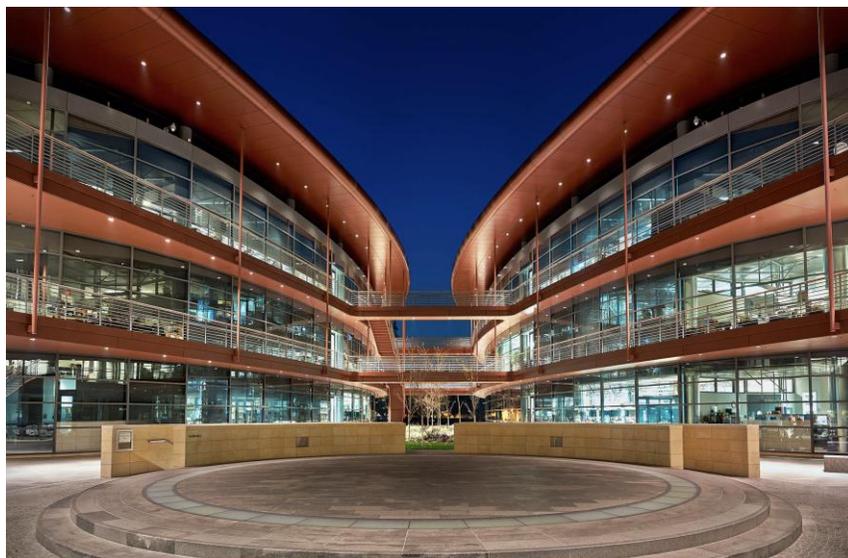


Рисунок 1. Центр Джеймса Х. Кларка, Стэнфордский университет, Стэнфорд, Калифорния

Центр Джеймса Х. Кларка при Стэнфордском университете, спроектированный архитектурным бюро Foster + Partners в сотрудничестве с MBT Architecture, представляет собой образец современного научно-исследовательского комплекса, ориентированного на междисциплинарное взаимодействие и гибкость пространственной организации [10]. Основной целью архитекторов было создание среды, способствующей взаимодействию между учёными различных дисциплин. Здание состоит из трёх крыльев, образующих внутренний двор с круглой сценой для мероприятий, под которой расположен круглый амфитеатр на 150 мест с регулируемым освещением.

Прозрачные стены, мостики между крыльями, открытые лестницы и балконы формируют открытое пространство и способствуют визуальной связанности пространств. В отличие от традиционных лабораторных зданий с закрытыми коридорами, Центр Кларка предлагает открытые балконы вместо внутренних коридоров, а планировка лабораторий может быть легко изменена благодаря мобильным рабочим станциям и гибким инженерным системам, что позволяет быстро адаптироваться к меняющимся исследовательским потребностям.

Центр предоставляет лабораторные, офисные и социальные пространства для 700 сотрудников из 23 различных факультетов университета. Он стратегически расположен между основными зданиями науки и инженерии и медицинским центром, действуя как социальный магнит для университета и поощряя взаимодействие студентов, преподавателей и исследователей из разных дисциплин.

Гарвардский университет и инженерный комплекс, Олстон, Массачусетс (Harvard University and Engineering Complex, Allston, MA) (Рис. 2) Заказчик - Гарвардский университет, Бостон, Архитектор-дизайнер - Behnisch Architekten, Площадь 50 540 м², Год реализации 2021 г.

Гарвардский научно-инженерный комплекс (Science and Engineering Complex, SEC) в Олстоне, спроектированный бюро Behnisch Architekten, представляет собой передовое образовательное здание, сочетающее инновационные архитектурные решения с принципами устойчивого развития [11].

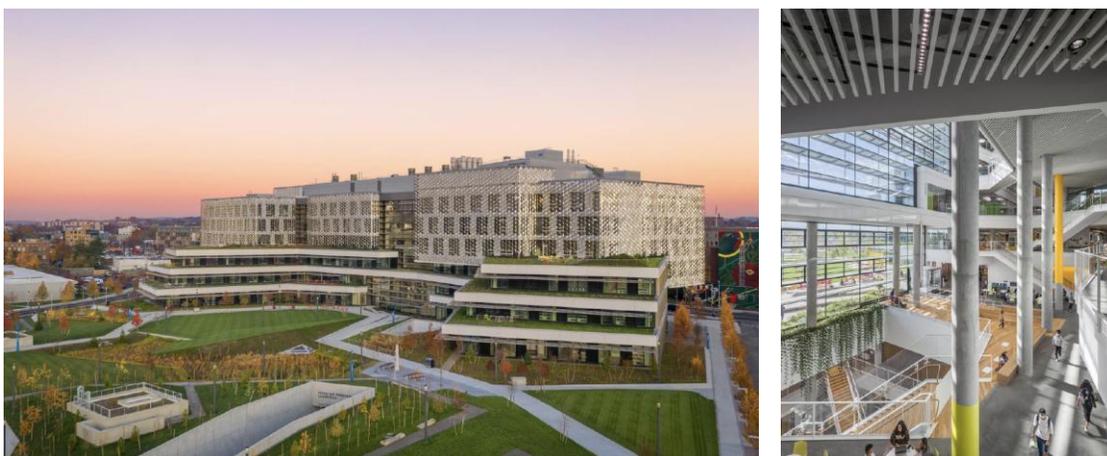


Рисунок 2. Гарвардский университет и инженерный комплекс, Олстон, Массачусетс

SEC задуман как гибкое и адаптивное пространство, способствующее междисциплинарному взаимодействию. Архитекторы создали открытую планировку с центральным атриумом, объединяющим различные уровни здания и обеспечивающим естественное освещение внутренних пространств. Использование прозрачных фасадов и внутренних перегородок способствует визуальной связанности и стимулирует сотрудничество между студентами и преподавателями.

Особое внимание уделено устойчивости: здание оснащено системой сбора дождевой воды, солнечными панелями и инновационной системой вентиляции, что позволяет значительно снизить энергопотребление и углеродный след. Фасад выполнен из переработанных материалов и оснащён динамическими солнцезащитными элементами,

регулирующими поступление солнечного света в зависимости от времени суток и погодных условий [11].

Комплекс включает в себя:

- Лаборатории для проведения научных исследований в области инженерии и прикладных наук.
- Учебные аудитории и классы для проведения лекций и семинаров.
- Пространства для совместной работы и общения студентов и преподавателей.
- Кафе и зоны отдыха, способствующие неформальному взаимодействию.
- Открытые террасы и зелёные зоны, интегрированные в общую структуру здания.

Такое зонирование обеспечивает функциональную гибкость и адаптацию к различным образовательным и исследовательским потребностям.

SEC получил высокую оценку в профессиональном сообществе за инновационный подход к проектированию и устойчивость. Здание было удостоено нескольких архитектурных наград, включая признание за лучший устойчивый проект года. Критики отмечают гармоничное сочетание эстетики и функциональности, а также вклад комплекса в развитие городской среды Олстона.

Кампус передовых исследований и технологических предприятий (CREATE - Campus for Research Excellence and Technological Enterprise) (Рис. 3)

Заказчик - Сингапурский национальный исследовательский фонд, Архитектор-дизайнер - Perkins+Will, Площадь 65 032 м², Год реализации 2013 г.



Рисунок 3. Кампус передовых исследований и технологических предприятий

Архитекторы Perkins+Will разработали кампус CREATE с целью стимулирования инноваций и взаимодействия между учёными и инженерами из ведущих исследовательских институтов и университетов мира. Проект включает три среднеэтажных здания и одну высокую башню, объединённые в единый комплекс. Здания имеют узкую форму с размещением коридоров и инженерных коммуникаций по периметру, что обеспечивает максимальное естественное освещение и гибкость внутренних пространств. Универсальный модуль позволяет размещать различные типы лабораторий — от вычислительных до биологических и химических, а также офисные помещения высокого качества [12]. Особое внимание уделено устойчивости: здания оснащены улучшенными остеклениями для снижения солнечного излучения, солнцезащитными элементами и автоматическими внутренними жалюзи для

максимального использования дневного света и уменьшения тепловой нагрузки. На фасадах и крышах установлены солнечные панели для выработки электроэнергии. Зелёные сады на крышах и вертикальное озеленение обеспечивают естественное охлаждение и способствуют энергосбережению.

Исследовательский институт Си Джей Блоссом Парк, Южная Корея (CJ Blossom Park, South Korea) (Рис.4)

Заказчик - СиДжей Корпорейшн, Южная Корея, Архитектор-дизайнер - CannonDesign
Площадь 111 485 m², Год реализации 2017 г.



Рисунок 4. Исследовательский институт Си Джей Блоссом Парк

CJ Blossom Park — это инновационный исследовательский центр компании CJ Corporation, расположенный в городе Сувон, Южная Корея. Проект был разработан архитектурным бюро Yazdani Studio при CannonDesign в сотрудничестве с Heerim Architects & Planners [13].

Здание представляет собой три эллиптические башни, символизирующие три основных направления деятельности CJ Corporation: фармацевтику, биотехнологии и пищевую промышленность. Эти башни объединены центральным атриумом, который служит пространством для взаимодействия и коммуникации между различными подразделениями компании. Форма башен вдохновлена логотипом CJ, состоящим из трёх лепестков, что подчёркивает корпоративную идентичность и стремление к гармонии между различными направлениями бизнеса. Центральный атриум соединяет первые пять этажей всех трёх башен, создавая общее пространство для сотрудников. В атриуме расположены различные зоны: кафе, рестораны, библиотеки, фитнес-центры и зоны отдыха, что способствует неформальному общению и обмену идеями между сотрудниками. Такой подход стимулирует кросс-функциональное сотрудничество и инновации.

Фасады башен выполнены из стекла с применением двойной оболочки и перфорированных экранов, которые обеспечивают естественное освещение внутренних пространств и снижают тепловую нагрузку, способствуя энергоэффективности здания. Внутренние лаборатории спроектированы с учётом максимальной гибкости: оборудование размещено на мобильных платформах, что позволяет быстро адаптировать пространство под различные исследовательские задачи.

Уникальные особенности:

- Гибкость лабораторных пространств: мобильные элементы интерьера позволяют быстро переоборудовать помещения под новые проекты.
- Центральный атриум: служит не только связующим элементом между башнями, но и пространством для общения и отдыха сотрудников.
- Экологичность: использование современных технологий фасадов и систем вентиляции снижает энергопотребление и повышает комфорт внутри здания.

Сколковский институт науки и технологий (Skolkovo Institute of Science and Technology) (Рис.5)

Заказчик - Сколковский институт науки и технологий, Архитектор-дизайнер - Herzog & de Meuron, Площадь 133 979 м², Год реализации 2018 г.

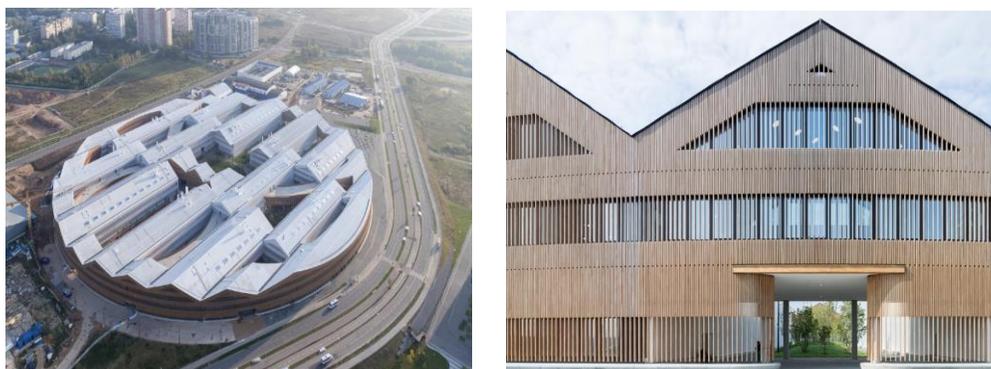


Рисунок 5. Сколковский институт науки и технологий

Сколковский институт науки и технологий (Сколтех) — это современный исследовательский университет, расположенный в инновационном центре «Сколково» под Москвой. Проект кампуса был разработан швейцарским архитектурным бюро Herzog & de Meuron и реализован в 2018 году [14]. Здание стало первым проектом этого бюро в России и получило международное признание, в том числе премию Prix Versailles в номинации «Лучший университетский кампус» в 2019 году.

Кампус Сколтеха представляет собой комплекс из трёх взаимосвязанных колец: Восточного, Агоры и Западного, образующих единую структуру диаметром около 280 метров. Внутри большого кольца расположены прямоугольные корпуса, организованные по модульной сетке 7×7 метров. Такая организация пространства обеспечивает гибкость и адаптивность внутренних помещений. Центральный двор, видимый из большинства точек кампуса, служит основным местом для проведения мероприятий и повседневного общения. Кампус включает в себя учебные аудитории, лаборатории, административные помещения, зоны отдыха и общественные пространства. Учебные и административные помещения расположены в кольцевых структурах, а лаборатории — в прямоугольных блоках внутри кольца. Технические и логистические зоны вынесены на подземный уровень, что позволяет максимально использовать наземное пространство для образовательных и исследовательских целей. Фасады кольцевых зданий облицованы вертикальными деревянными ламелями из сибирской лиственницы, которые регулируют поступление дневного света и создают динамичную игру света и тени. Лабораторные корпуса имеют фасады из белых алюминиевых панелей, что придаёт им современный и технологичный облик. Единая крыша с покатыми скатами объединяет все элементы кампуса в целостную архитектурную композицию. При проектировании кампуса особое

внимание уделялось экологическим аспектам и энергоэффективности. Использование натуральных материалов, эффективных систем вентиляции и естественного освещения способствует созданию комфортной и устойчивой среды для обучения и исследований. Ландшафтный дизайн интегрирует кампус в окружающую природную среду, создавая гармоничное взаимодействие между архитектурой и природой.

3. Изучение профессиональных источников и экспертных обзоров.

Анализ материалов, опубликованных на *ArchDaily*, позволил выявить ключевые подходы к проектированию кампусов нового поколения. Так, James H. Clark Center представлен как образец открытой и междисциплинарной среды, где архитектура способствует коллаборации через прозрачность, общие зоны и гибкую структуру. Кампус CREATE в Сингапуре был отмечен за модульность и адаптивность, особенно ценную для международных исследовательских проектов. Также в числе ярких примеров — CJ Blossom Park, где подчеркивается уникальное формообразование в виде трёх эллиптических башен и мощный визуальный образ, отражающий корпоративную идентичность.

Платформы Dezeen и DesignBoom акцентируют внимание на архитектурной выразительности и технологичности объектов. Harvard Engineering Complex описывается как пример одного из самых устойчивых образовательных зданий США, где применяются фасады из переработанных материалов, системы водоотведения и озеленённые крыши. Skolkovo Institute представлен как символ научного будущего России — с кольцевой структурой, фасадами из сибирской лиственницы и выразительной пространственной композицией, обеспечивающей баланс между открытостью и фокусом на научную деятельность.

Дополнительно были проанализированы данные *QS Best Student Cities* и рейтинга *UI GreenMetric*, где высоко оцениваются кампусы с точки зрения устойчивого развития, интеграции с городской средой и комфорта для студентов [15]. Особенно отмечены практики управления микроклиматом, эффективное использование ресурсов и развитие социальных пространств, что в совокупности формирует среду, способствующую образованию, научным открытиям и кросс-дисциплинарному взаимодействию.

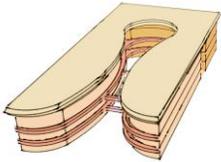
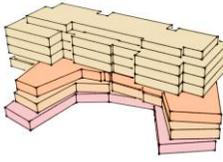
Результаты и Обсуждение

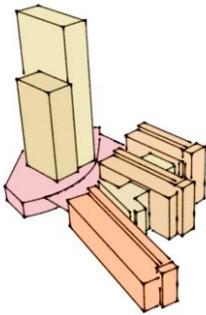
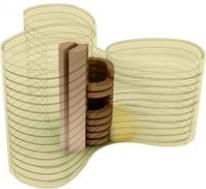
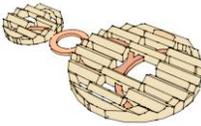
В ходе исследования были проанализированы пять университетских и исследовательских кампусов, отобранных на основе международных архитектурных премий и рейтингов: Центр в Олстоне (США), кампус CREATE в Сингапуре, исследовательский центр CJ Blossom Park в Южной Корее и Сколковский институт науки и технологий в России. Объекты выбраны с учётом их инновационного подхода к организации пространства, междисциплинарной среды, устойчивости и архитектурной выразительности. Основное внимание в анализе уделено архитектурной концепции, пространственной и планировочной структуре, гибкости и функциональности, а также экологическим и инновационным решениям, визуальной идентичности и интеграции в образовательную и научную среду. Как показано в Таблице 1 ниже, каждый из объектов представляет уникальный подход, отражающий приоритеты конкретного института и культурный контекст его создания.

Сравнительный анализ пяти университетских кампусов, получивших международное признание, показал наличие общих архитектурных принципов, лежащих в основе их успешности. Визуально-образные решения всех объектов направлены на формирование

узнаваемой идентичности: будь то символика логотипа (CJ Blossom Park), модульная гибкость (CREATE) или замкнутая структурная организация как в Сколково. Каждый из кампусов представляет собой не только образовательную инфраструктуру, но и среду, стимулирующую научное сотрудничество, креативность и междисциплинарный обмен.

Таблица 1. Сравнительный анализ кампусов по объемно-функциональному зонированию

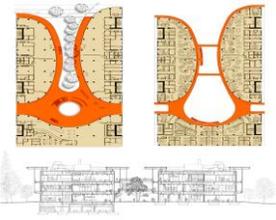
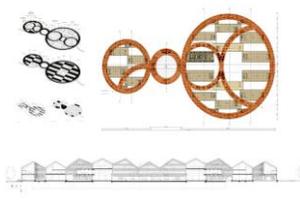
Кампус	Архитектурная концепция	Объемно-функциональное зонирование	Графические схемы объемно-функционального зонирования	Экологические и инновационные решения
James H. Clark Center (Стэнфорд)	П-образное здание с прозрачными фасадами, открытые мосты и стеклянные стены создают визуальную связанность, подчёркивая междисциплинарность. Архитектура символизирует «науку без границ».	Центральный атриум связывает лаборатории, офисы, зоны отдыха и кафе. По периметру – исследовательские блоки. Коммуникации сквозные, стимулируют взаимодействие.		Естественная вентиляция, фасады из стекла с солнцезащитой, пассивное охлаждение, ориентация на снижение энергозатрат.
Harvard Engineering Complex	Прямоугольный объём с алюминиевыми фасадами и вертикальными ламелями, зелёные крыши интегрированы в общую композицию. Образ устойчивого и рационального инженерного центра.	Зонирование вокруг внутренних зелёных дворишков. Внутри – лаборатории, аудитории, переговорные и места групповой работы. Пространства гибкие, с трансформируемыми границами.		LEED Platinum; фасады из переработанного алюминия, зелёные крыши, солнечные панели, система сбора дождевой воды.

CREATE (Сингапур)	Горизонтально вытянутые стеклянные блоки с модульной структурой. Простота форм подчёркивает универсальность и технологичность. Архитектура ориентирована на международное сотрудничество.	Модульные блоки соединены галереями, нижние уровни — общие пространства, лаборатории и офисы на верхних этажах. Пространства гибкие, ориентированы на коллаборацию.		Двойные стеклянные фасады с защитой от перегрева, автоматизированное управление климатом, повторное использование воды.
CJ Blossom Park (Южная Корея)	Три эллипсоидные башни, объединённые общим стеклянным атриумом. Форма символизирует логотип компании CJ. Архитектура корпоративная, лаконичная, с футуристическими элементами.	Центральный атриум соединяет три функционально разделённые башни (фармацевтика, биотехнологии, пищевая промышленность). Нижние уровни — общие сервисы, кафе, коммуникации.		Двойные стеклянные фасады и перфорированные панели, регулируемые солнцезащитные экраны, энергоэффективная вентиляция.
Skolkovo Institute (Россия)	Кольцевая структура диаметром 280 м, фасады из сибирской лиственницы и стекла. Символ научного кольца, объединяющего образование и исследования. Образ строгости и инноваций.	Внешнее кольцо — учебные и административные зоны, внутренние блоки — лаборатории. Центральный двор — общественное пространство. Подземный уровень — техническая инфраструктура.		Фасады из сибирской лиственницы и триплекс-стекла, геотермальное отопление, естественное освещение, фильтрация воздуха.

Планировочные решения (таблица 2) варьируются от кольцевых (Сколково) и линейных (Harvard) до гибридных (CJ Blossom Park), при этом все проекты обеспечивают тесную взаимосвязь между исследовательскими, учебными и общественными пространствами. Важной характеристикой является применение экологически устойчивых и технологически продвинутых решений: от использования переработанных и

натуральных материалов (сибирская лиственница, алюминий) до сложных систем микроклимата и управления ресурсами. Эти элементы становятся неотъемлемой частью архитектурной концепции и отвечают требованиям современной образовательной среды.

Таблица 2. Сравнительный анализ кампусов по планировочной структуре

Кампус	Общественные зоны (атриум, лобби)	Образовательные зоны (аудитории)	Исследовательские зоны (лаборатории)	Тип пространственной структуры	Графические схемы планировочной структуры
James H. Clark Center	Центральный атриум, объединяющий лаборатории и офисы	Рядом с лабораториями, интегрированы в структуру	По периметру здания, визуально связаны с атриумом	П-образная, осевая диссимметрия	
Harvard Engineering Complex	Зелёные дворики и общие внутренние пространства	Размещены вдоль фасадов и вблизи входных групп	Большие лабораторные кластеры внутри объёма	Линейная с внутренними дворами	
CREATE Campus	Общие зоны на террасах, фойе и соединяющих галереях	Малые обучающие блоки, распределённые по периметру	Модульные лаборатории, легко трансформируемые	Блочно-модульная с горизонтальными связями	
CJ Blossom Park	Центральный стеклянный атриум между башнями	Одна из башен включает образовательные функции	Отдельные башни с чёткой специализацией	Радиальная от центра (атриума)	
Skolkovo Institute	Центральный двор в кольцевой структуре	Периметр внешнего кольца кампуса	Центральные прямоугольные блоки внутри кольца	Кольцевая с внутренним ядром	

Заключение

В результате проведённого исследования, в рамках которого были рассмотрены пять ведущих мировых университетских кампусов — James H. Clark Center (Stanford University), Harvard Engineering Complex, CREATE (Campus for Research Excellence and Technological Enterprise), CJ Blossom Park (South Korea) и Skolkovo Institute of Science and Technology — была достигнута поставленная цель: обобщить международный опыт и современные архитектурные тенденции проектирования университетских кампусов. Выбор объектов основывался на международных рейтингах, признанных премиях и стандартах качества, что позволило сосредоточиться на действительно значимых и инновационных примерах.

Сравнительный анализ кампусов по архитектурной концепции, пространственной структуре, функциональному зонированию, экологическим и технологическим решениям позволил выявить ключевые принципы, определяющие успешность кампусного пространства. Все поставленные задачи были последовательно выполнены: проведена типологизация мировых моделей, выделены архитектурные тенденции, проанализированы международные стандарты и премии, а также рассмотрены особенности проектирования с позиции гибкости, устойчивости, междисциплинарности и интеграции с городской средой.

Полученные результаты позволили сформировать целостное представление о современной парадигме кампусного проектирования. Обзор и анализ подтвердили, что кампусы нового поколения выходят за рамки традиционного академического пространства, превращаясь в многофункциональные экосистемы, способствующие инновациям, сотрудничеству и устойчивому развитию. Эти выводы служат фундаментом для дальнейших исследований, в том числе — для адаптации лучших международных практик в архитектурно-градостроительном контексте Казахстана.

Для проектирования университетских кампусов в Казахстане необходимо учитывать как глобальные тенденции, так и местные особенности. На основе анализа мирового опыта и с учетом специфики Казахстана можно выделить три ключевых принципа проектирования университетских кампусов. Важным принципом является создание не только образовательной инфраструктуры, но и среды, стимулирующей научное сотрудничество, креативность и междисциплинарный обмен. Второй ключевой принцип — внедрение экологически устойчивых и технологически продвинутых решений: использование переработанных и натуральных материалов, систем микроклимата и энергоэффективного управления ресурсами, что особенно актуально в условиях континентального климата. Третий принцип связан с интегративным подходом: кампус должен быть многофункциональным, открытым и органично встроенным в структуру города, формируя инновационные кластеры в крупнейших мегаполисах страны и одновременно учитывая культурные и климатические особенности казахстанской среды.

Вклад авторов

Батырова М.Х. – концепция, сбор данных, анализ и интерпретация результатов.

Мауленова Г.Д. – коррективная, утверждение окончательной версии статьи для публикации.

Список литературы

1. Серебрякова Е. А., Кузнецова М. В. Современные университетские кампусы с

- использованием зелёных инноваций: зарубежный и российский опыт // Современные проблемы архитектуры и градостроительства. – 2023. – № 1. – С. 45–52.
2. Амангельдиева Р. А. Архитектурная реновация промышленных объектов Казахстана с учетом современных тенденций: дис. ... канд. архитектуры. – Алматы: Международная образовательная корпорация, 2024. – 150 с. [МОК](#)
 3. Гребенюк В. Н., Колосова Н. С. Современный университетский кампус в городском пространстве как фактор развития образовательной среды и социально-экономических процессов // Международный студенческий научный вестник. – 2020. – № 7-1. – С. 102–108.
 4. Campus: University or a Modern Urban Structure? // Civil Engineering and Architecture. – 2022. – Vol. 10, No. 3. – P. 765–773. DOI: 10.13189/cea.2022.100313. [HRPUB](#)
 5. Scientific Equipment and Furniture Association (SEFA). SEFA Lab of the Year® Rules. – 2025. – URL: <https://www.sefalabs.com/assets/docs/SEFA-Lab-of-the-Year%20Rules.pdf> (дата обращения: 06.05.2025). [sefalabs.com](#)
 6. Prix Versailles. Official Website. – URL: <https://www.prix-versailles.com/> (дата обращения: 06.05.2025). [prix-versailles](#)
 7. Popov, A.V., Syrova, O.I. University campuses in Russia: architectural and urban development typology // Civil Engineering and Architecture. – 2022. – Vol. 10, No. 3. – P. 765–773. DOI: 10.13189/cea.2022.100313. [ResearchGate+1](#) [Центральноамериканские журналы онлайн+1](#)
 8. Agrawal, P., Yadav, M. Campus Design of Universities: An Overview // Journal of Design and Built Environment. – 2021. – Vol. 21(31). – P. 37–51. [ejournal.um.edu.my](#)
 9. Popov, A.V., Syrova, O.I. Prospects for the Development of University Campuses Integrated into Urban Environment in Russia and Kazakhstan // Civil Engineering and Architecture. – 2023. – Vol. 11, No. 4. – P. 148–157. DOI: 10.13189/cea.2023.110410. [ResearchGate+1](#) [HRPUB+1](#)
 10. Foster + Partners. James H. Clark Center, Stanford University [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.fosterandpartners.com/projects/james-h-clark-center-stanford-university/> (дата обращения: 06.05.2025). [Foster + Partners](#)
 11. Behnisch Architekten. Harvard University Science and Engineering Complex [Электронный ресурс]. – URL: <https://behnisch.com/work/projects/0274> (дата обращения: 06.05.2025).
 12. ArchDaily. CREATE / Perkins+Will [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.archdaily.com/604001/create-perkins-will> (дата обращения: 06.05.2025).
 13. CannonDesign. CJ Blossom Park – R&D Headquarters for CJ Corporation [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.cannondesign.com/our-work/work/cj-blossom-park/> (дата обращения: 06.05.2025).
 14. Herzog & de Meuron. Skolkovo Institute of Science and Technology (Skoltech) [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.herzogdemeuron.com/projects/skolkovo-institute-of-science-and-technology> (дата обращения: 06.05.2025).
 15. UI GreenMetric. World University Rankings [Электронный ресурс]. – URL: <https://greenmetric.ui.ac.id/> (дата обращения: 06.05.2025).

М.Х.Батырова, Г.Д.Мауленова

*Сәулет және құрылыс институты Т.К. Басенова, Satbayev University, Алматы,
Қазақстан*

Университет кампустарын жобалаудың әлемдік тәжірибесі және заманауи үрдістері.

Аңдатпа Мақалада университеттік кампустарды жобалаудың халықаралық тәжірибесі мен заманауи үрдістері зерттеліп, инновациялық және көпфункционалды білім беру кеңістіктерін қалыптастыру қағидаттарына ерекше назар аударылады. Университет аумақтарының білім беру, ғылыми-зерттеу, әлеуметтік және қоғамдық функцияларды біріктіретін кешенді ғылыми-білім беру экожүйелеріне трансформациялану мәселесіне ерекше көңіл бөлінеді. Стэнфорд университетіндегі Джеймс Х. Кларк орталығы, Гарвард университетінің Олстондағы инженерлік кешені, Сингапурдағы CREATE кампусы, Оңтүстік Кореядағы CJ Blossom Park және Ресейдегі Сколково ғылым және технология институты сияқты әлемнің жетекші кампустарының мысалдары талданды. Кампустардың кеңістіктік икемділігін, пәнаралық өзара әрекеттестігін, тұрақтылығын және олардың қалалық ортаға интеграциясын қамтамасыз ететін негізгі сәулеттік-жоспарлау шешімдері қарастырылды. Әртүрлі ғылыми бағыттардың өкілдері арасындағы коммуникацияны, бірлескен жұмысты және ғылыми өзара әрекеттесуді ынталандыратын қоғамдық кеңістіктерді қалыптастыру мәселесіне ерекше назар аударылады. Кампус кеңістіктерін ұйымдастырудың ашық, бейімделгіш және экологиялық шешімдерді қамтитын заманауи модельдері анықталды. Зерттеу нәтижелері дәстүрлі монофункционалды құрылымдардан динамикалық және интеграцияланған кампус экожүйелеріне көшу қажеттілігін көрсетеді, бұл Қазақстан университеттерінің сәулеттік-қала құрылыстық дамуы үшін жаһандық білім беру және ғылыми сын-қатерлер контекстінде ерекше өзекті болып табылады.

Түйін сөздер: сәулет, университет кампустары, кеңістіктік ұйымдастыру, икемділік, тұрақтылық, пәнаралық интеграция, инновация.

M.Kh. Batyrova, G.D. Maulenova

*T.K. Basenov Institute of Architecture and Construction, Satbayev University, Almaty,
Kazakhstan*

Global Experience and Contemporary Trends in University Campus Design.

Abstract. This article examines international experience and contemporary trends in the design of university campuses, with particular attention to the principles of forming innovative and multifunctional educational spaces. Special emphasis is placed on the transformation of university territories into integrated scientific and educational ecosystems that combine educational, research, social, and public functions. The study analyzes examples of leading global campuses, including the James H. Clark Center at Stanford University, the Harvard University Engineering Complex in Allston, the CREATE campus in Singapore, CJ Blossom Park in South Korea, and the Skolkovo Institute of Science and Technology in Russia. Key architectural and planning solutions that ensure spatial flexibility, interdisciplinarity, sustainability, and the integration of

campuses into the urban environment are examined. Particular attention is given to the formation of public spaces that stimulate communication, collaborative work, and scientific interaction among representatives of various fields of knowledge. Contemporary models of campus spatial organization are identified, including open, adaptive, and environmentally sustainable solutions. The results of the study demonstrate the need to transition from traditional monofunctional structures to dynamic and integrated campus ecosystems, which is highly relevant for the architectural and urban development of universities in Kazakhstan in the context of global educational and scientific challenges.

Keywords: architecture, university campuses, spatial organization, flexibility, sustainability, interdisciplinarity, innovation.

References

1. Serebryakova E. A., Kuznetsova M. V. *Sovremennye universitetskie kampusy s ispolzovaniem zelenykh innovatsii: zarubezhnyi i rossiiskii opyt // Sovremennye problemy arkhitektury i gradostroitelstva.* – 2023. – № 1. – S. 45–52.
2. Amangeldieva R. A. *Arkhitekturnaya renovatsiya promyshlennykh obektov Kazakhstana s uchetom sovremennykh tendentsii: dis. ... kand. arkhitektury.* – Almaty: Mezhdunarodnaya obrazovatel'naya korporatsiya, 2024. – 150 s.
3. Grebenyuk V. N., Kolosova N. S. *Sovremenniy universitetskii kampus v gorodskom prostranstve kak faktor razvitiya obrazovatelnoi sredy i sotsialno-ekonomicheskikh protsessov // Mezhdunarodnyi studencheskii nauchnyi vestnik.* – 2020. – № 7-1. – S. 102–108.
4. *Campus: University or a Modern Urban Structure? // Civil Engineering and Architecture.* – 2022. – Vol. 10, No. 3. – P. 765–773. DOI: 10.13189/cea.2022.100313.[HRPUB](#)
5. Scientific Equipment and Furniture Association (SEFA). *SEFA Lab of the Year® Rules.* – 2025. – URL: <https://www.sefalabs.com/assets/docs/SEFA-Lab-of-the-Year%20Rules.pdf> (accessed: 06.05.2025).[sefalabs.com](#)
6. Prix Versailles. Official Website. – URL: <https://www.prix-versailles.com/> (accessed: 06.05.2025).[prix-versailles](#)
7. Popov, A.V., Syrova, O.I. *University campuses in Russia: architectural and urban development typology // Civil Engineering and Architecture.* – 2022. – Vol. 10, No. 3. – P. 765–773. DOI: 10.13189/cea.2022.100313.[ResearchGate+1](#)[Центральноамериканские журналы онлайн+1](#)
8. Agrawal, P., Yadav, M. *Campus Design of Universities: An Overview // Journal of Design and Built Environment.* – 2021. – Vol. 21(31). – P. 37–51.[ejournal.um.edu.my](#)
9. Popov, A.V., Syrova, O.I. *Prospects for the Development of University Campuses Integrated into Urban Environment in Russia and Kazakhstan // Civil Engineering and Architecture.* – 2023. – Vol. 11, No. 4. – P. 148–157. DOI: 10.13189/cea.2023.110410.[ResearchGate+1](#)[HRPUB+1](#)
10. Foster + Partners. *James H. Clark Center, Stanford University [Electronic resource].* – URL: <https://www.fosterandpartners.com/projects/james-h-clark-center-stanford-university/> (accessed: 06.05.2025).[Foster + Partners](#)
11. Behnisch Architekten. *Harvard University Science and Engineering Complex [Electronic resource].* – URL: <https://behnisch.com/work/projects/0274> (accessed: 06.05.2025).
12. ArchDaily. *CREATE / Perkins+Will [Electronic resource].* – URL:

- <https://www.archdaily.com/604001/create-perkins-will> (accessed: 06.05.2025).
13. CannonDesign. CJ Blossom Park – R&D Headquarters for CJ Corporation [Electronic resource]. – URL: <https://www.cannondesign.com/our-work/work/cj-blossom-park/> (accessed: 06.05.2025).
 14. Herzog & de Meuron. Skolkovo Institute of Science and Technology (Skoltech) [Electronic resource]. – URL: <https://www.herzogdemeuron.com/projects/skolково-institute-of-science-and-technology> (accessed: 06.05.2025).
 15. UI GreenMetric. World University Rankings [Electronic resource]. – URL: <https://greenmetric.ui.ac.id/> (accessed: 06.05.2025).

Сведения об авторах

Батырова М.Х. – автор для корреспонденции, докторант 2 курса, Институт архитектуры и строительства им. Т. К. Басенова, Satbayev University, ул. Сатпаева 22, Алматы 050000, Казахстан.

Мауленова Г.Д. – кандидат архитектуры, ассоциированный профессор, кафедра «Архитектура», Институт архитектуры и строительства им. Т. К. Басенова, Satbayev University, ул. Сатпаева 22, Алматы 050000, Казахстан.

M.Kh. Batyrova – corresponding author, 2nd-year doctoral student, T.K. Bassenov Institute of Architecture and Construction, Satbayev University, 22 Satpayev Street, Almaty 050000, Kazakhstan.

G.D. Maulenova – Candidate of Architecture, Associate Professor, Department of Architecture, T.K. Bassenov Institute of Architecture and Construction, Satbayev University, 22 Satpayev Street, Almaty 050000, Kazakhstan.

Батырова М.Х. – хат-хабар авторы, 2 курс докторанты, Т.Қ. Бәсенов атындағы Архитектура және құрылыс институты, Satbayev University, Сәтбаев көшесі 22, Алматы 050000, Қазақстан.

Мауленова Г.Д. – архитектура кандидаты, қауымдастырылған профессор, «Сәулет» кафедрасы, Т.Қ. Бәсенов атындағы Архитектура және құрылыс институты, Satbayev University, Сәтбаев көшесі 22, Алматы 050000, Қазақстан.



Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)



МРНТИ 06.81.23

Научная статья

<https://doi.org/10.32523/2616-7263-2026-154-1-84-101>

Роль вантовых конструкций в создании общественных и культурных пространств

Н.Ж. Ақжігіт* , С.Ш. Садыкова 

Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан

E mail: sadykova_ssh@enu.kz ,sezimakzhigit@mail.ru

Аннотация. Вантовые конструкции представляют собой важный элемент современного архитектурного проектирования, играя ключевую роль в создании общественных и культурных пространств. Вантовые конструкции предоставляют возможность создания просторных и открытых зон с минимальным количеством опорных элементов, что создает атмосферу свободы и легкости. В этой статье рассматривается влияние вантовых систем на развитие функциональности и эстетики общественных и культурных пространств, а также их роль в формировании архитектурных форм. Цель исследования заключается в анализе особенностей и преимуществ использования вантовых конструкций для создания уникальных и эффективных общественных пространств. В рамках статьи рассматриваются как теоретические аспекты, так и практические примеры успешного применения вантовых систем в архитектуре. Исследование опирается на анализ существующих проектов, сравнение различных конструктивных решений и изучение теоретических аспектов вантовых систем. Основные результаты показывают, что вантовые конструкции способствуют созданию открытых и эстетически привлекательных пространств, которые также эффективны с точки зрения функциональности и устойчивости. Важность исследования заключается в расширении знаний о применении вантовых систем и их возможностях в архитектуре объектов общественного назначения. Практическое значение данной работы заключается в углубленном понимании и демонстрации возможностей вантовых конструкций в создании общественных пространств.

Ключевые слова: вантовые конструкции, общественные пространства, архитектурное проектирование, функциональность, эстетика

Введение

В современном архитектурном проектировании общественные и культурные пространства становятся все более важными для формирования удобной и привлекательной городской среды. Вантовые конструкции, характеризующиеся использованием натянутых тросов или канатов для распределения нагрузок, находят широкое применение в современной архитектуре и строительстве. Конструкции с натяжными элементами представляют собой один из наиболее привлекательных и функциональных аспектов современного архитектурного проектирования, оказывая значительное влияние в создании общественных и культурных пространств. Выбор темы данного исследования основывается на растущем интересе к вантовым конструкциям как архитектурным элементам, которые не только определяют эстетический облик зданий, но и служат катализаторами социального взаимодействия.

Несмотря на наличие различных исследований, посвящённых структуре и функциональности вантовых конструкций, до сих пор существует недостаток анализа их влияния на общественную жизнь и культурные практики. Это создает проблемную ситуацию, в которой важные аспекты использования вантовых конструкций в контексте общественных и культурных пространств остаются недостаточно освещёнными. Актуальность темы определяется необходимостью поиска новых решений и подходов для создания устойчивых и привлекательных городских пространств, способствующих взаимодействию между горожанами и культурному обмену между ними. В условиях быстрой урбанизации и изменений в социальном поведении населения особенно важным становится изучение того, как архитектурные формы могут влиять на жизнь сообществ. Проблема заключается в том, что существующие исследования часто сосредоточены на технических характеристиках конструкций, оставляя за пределами анализа их социальные и культурные аспекты. Это подчеркивает теоретическую и практическую значимость темы, так как понимание этих аспектов может обогатить как архитектурную практику, так и научные исследования.

Объектом исследования является вантовые конструкции в архитектуре. Предмет исследования их роль в создании общественных и культурных пространств. Цель исследования заключается в анализе влияния вантовых конструкций на социокультурную динамику, что позволит выявить их потенциал в формировании общественных и культурных пространств. Задачи исследования включают изучение различных примеров вантовых конструкций, анализ их проектных решений и выявление факторов, способствующих общественным активностям в этих пространствах. Для достижения поставленных целей будут использованы различные методы исследования, включая анализ литературы.

Эти подходы позволят глубже понять, как вантовые конструкции могут способствовать созданию многофункциональных пространств, повышая уровень социального взаимодействия и культурного обмена. Гипотеза исследования заключается в том, что вантовые конструкции, обладая эстетической и функциональной привлекательностью, могут значительно улучшить качество общественной жизни и стать важным элементом в создании общественных пространств. Значение работы состоит в том, что она может внести вклад в архитектурную практику, способствуя формированию более устойчивых и интегрированных городских пространств, что актуально в условиях современного общества. Вантовые конструкции занимают важное место в современном архитектурном

проектировании общественных и культурных пространств, что отражается в ряде значительных исследований. Агеева Е.Ю. и Спиридонова А.И. в своём учебном пособии анализируют применение вантовых конструкций в зрелищных зданиях, подчеркивая их ключевую роль в создании открытых пространств без внутренних опор. Это позволяет не только оптимизировать использование площади, но и повышает эстетическую привлекательность зданий, делая их более функциональными для массового зрителя [1]. Кужахметова Э.Р. и Сапожников А.И. обращают внимание на архитектурную выразительность зданий с криволинейными поверхностями, включая вантовые конструкции исследованные Кужахметовой Э.Р. и Сапожниковым А.И. Их работа демонстрирует, как такие решения способствуют созданию пространств, отвечающих не только функциональным, но и эстетическим требованиям [2]. В своём учебном пособии по висячим и вантовым конструкциям Кирсанов Н.М. рассматривает теоретические и практические аспекты проектирования. Его труд является важным источником знаний для студентов и специалистов, которые стремятся применять вантовые системы в общественных зданиях [3].

Хитрук С.А. в своей статье акцентирует внимание на современных подходах к вантовым конструкциям. Он рассматривает технологические инновации и методы, которые делают вантовые системы более доступными для применения в городской архитектуре, что особенно важно для создания общественных объектов [4]. В своей книге Harris J.V. и Pui-K Li K. освещают опыт международной практики в области вантовых конструкций. Авторы анализируют, как такие конструкции помогают решать задачи современного проектирования, создавая визуально привлекательные и функциональные пространства [5]. Амосков М.М. акцентирует внимание на перспективных направлениях развития вантовых конструкций в мостостроении, которые могут быть адаптированы для архитектурных объектов [6]. Морозов А.П., Василенко О.В. и Миронков Б.А. в своём исследовании показывают, как конструктивные решения влияют на восприятие пространства, что является ключевым аспектом при проектировании культурных объектов [7].

Про основы архитектурной композиции, которые могут быть применены для интеграции вантовых конструкций излагают Иконников А.В. и Степанов Г.П. [8]. Океанов Г.В. рассматривает адаптацию большепролетных светопрозрачных покрытий, используемых на стадионах, к работе в режиме "Наследие", что подчеркивает роль вантовых систем в повышении многофункциональности общественных зданий [9]. Дедюрина Е.П. и Демченко А.И. в своих исследованиях описывают успешные примеры использования вантовых систем, что подтверждает их актуальность в современной архитектуре [10]. В своей статье Демченко А.И. обсуждает надежность и эффективность вантовых конструкций, подчеркивая их применение в крупных общественных зданиях [11]. Кулагина Т.О., Климова А.А., Агеева Е.Ю. анализируют бионические элементы в архитектуре на примере Большого национального театра в Пекине, иллюстрируя потенциал куполов-оболочек и вантовых структур [12]. Рассмотренные источники демонстрируют многогранность вантовых конструкций, их роль в создании выразительных и функциональных общественных и культурных пространств. Исследования показывают, что эти системы объединяют технологическую эффективность и архитектурную эстетику, делая их актуальным инструментом современного строительства.

Методология

Методология исследования включает:

1. Библиографический анализ - поиск, систематизация и изучение научной литературы, статей, проектов;
2. Теоретический анализ – исследование принципов проектирования вантовых конструкций;
3. Историко-аналитический метод - изучение исторических аспектов развития вантовых конструкций;
4. Метод обобщения результатов - обобщение полученных данных для выявления влияния вантовых конструкций на формирование общественных и культурных пространств.

Основные исследовательские вопросы, на которые направлено данное исследование, касаются влияния вантовых конструкций на общественное взаимодействие, культурные аспекты и условия, способствующие их успешному функционированию. В частности, исследуется, как вантовые конструкции формируют социальные связи и взаимодействия в созданных пространствах, какие культурные элементы становятся более выраженными благодаря их внедрению в общественные здания, а также в каких условиях они превращаются в центры культурной активности, способствуя формированию уникальной городской идентичности и активного общественного участия.

В рамках исследования выдвигается гипотеза о том, что вантовые конструкции, благодаря своей архитектурной выразительности имеют возможность создавать уникальные общественные и культурные пространства.

Этапы исследования включает четыре основных этапа. На первом этапе был проведен сбор литературы по теме вантовых конструкций, включая научные исследования, статьи и проекты. На втором этапе изучены теоретические аспекты на основе классификаций, а также визуальное восприятие вантовых конструкций. Третий этап включает анализ исторических аспектов развития вантовых конструкций. На этом этапе также проведены примеры несколько значительных объектов с вантовыми конструкциями для более глубокого изучения. На четвертом этапе формирование выводов о влиянии вантовых конструкций на общественные и культурные пространства.

Результаты и Обсуждение

Вантовые конструкции - это всякие конструкции, которые не изменяются геометрически и основными несущими элементами которых являются гибкие, натянутые прямолинейные ванты. Ванты – несущие элементы стержневого типа (тросы, канаты, гибкие стержни, пучки высокопрочной проволоки, ленты и т.п.), работающие в основном на растяжение [1]. Вантовые конструкции широко применяют в спортивных комплексах [2], кинотеатрах, закрытых и частично открытых стадионах, торговых центрах, аэровокзалах и др. [3].

Ванты могут быть закреплены на пилонах или прикреплены к замкнутым контурам, которые могут быть округлыми (например, кольцо, эллипс) или прямоугольными. Эти ванты изготавливаются с предварительным напряжением, что позволяет им воспринимать сжимающие усилия под действием эксплуатационных нагрузок, не испытывая деформации сжатия, при правильно подобранной геометрии установки. Таким образом, несмотря на то, что вантовая система состоит только из гибких элементов, она

функционирует как жесткая ферма. Вантовые конструкции могут быть плоскими, как, например, вантовые мосты, или пространственными, такими как покрытия больших общественных и промышленных зданий. Пространственные вантовые конструкции часто имеют двоякую кривизну, и одним из простейших примеров является покрытие в форме седла. Такое покрытие состоит из двух пересекающихся систем вант — поперечной и продольной. Эти ванты закреплены в жесткой основе, которая принимает сжимающие нагрузки от вант.

Поперечные ванты предварительно натягиваются, что придает конструкции необходимую пространственную жесткость. На поперечную систему укладываются кровельные плиты, которые, при правильной стыковке, образуют монолитное покрытие. Это значительно увеличивает жесткость всей системы. Благодаря своей легкости и экономичности, вантовые конструкции являются эффективным решением для создания покрытий зданий с большими пролётами. Вантовые конструкции дают возможность совершать покрытия зданий всевозможных конфигураций гарантируя устойчивость целой системы [4]. Также возможны комбинации арочных и вантовых систем, где ванты помогают поддерживать арку и предотвращают её деформацию в плоскости.

Вантовые конструкции предлагают ряд значительных преимуществ по сравнению с традиционными стальными системами, включая эффективное использование материала, поскольку в растянутых несущих элементах задействуется вся площадь поперечного сечения тросов и применяются высокопрочные стали, что снижает массу конструкции. Упрощённый монтаж позволяет избегать использования лесов и подмостей, что облегчает процесс возведения и снижает трудозатраты. Кроме того, ванты, свернутые в бухты, упрощают транспортировку и складирование. Они также позволяют перекрывать длинные пролеты без необходимости установки промежуточных опор, что делает их экономичными при увеличении пролета, так как масса несущей конструкции остается относительно небольшой. Эстетическая привлекательность необычных форм вантовых конструкций может значительно повысить выразительность сооружения, а конструкция покрытий создает оптимальные условия внутри здания для акустики, видимости и освещенности.

Несмотря на свои преимущества, вантовые конструкции также имеют некоторые недостатки. Во-первых, деформативность - под воздействием внешних нагрузок ванты могут изменять свою первоначальную геометрическую форму, что приводит к повышенной деформативности покрытий и требует дополнительных мероприятий для обеспечения необходимой жесткости конструкции. Во-вторых, дополнительные расходы на материалы: для установки опорных элементов может потребоваться значительное количество материалов, что увеличивает общую стоимость.

Кроме того, повышенная деформативность затрудняет использование вантовых конструкций в производственных зданиях с крановым оборудованием. Наконец, проблемы с водоотводом могут возникнуть из-за сложности устройства эффективного водоотвода в таких конструкциях.

Для снижения деформативности вантовых конструкций используются различные методы стабилизации покрытия. Основные методы стабилизации включают:

-Стабилизация с помощью пригрузки: Этот метод предполагает использование дополнительных нагрузок, которые могут быть представлены либо в виде свободно размещенных объектов (например, сборных железобетонных плит), либо в виде жестких конструкций (например, монолитных железобетонных оболочек). В случае использования

монолитной оболочки предварительное пригружение покрытия должно быть выполнено до окончательной заливки, чтобы предотвратить появление растягивающих усилий в оболочке в процессе эксплуатации;

-Создание двухпоясных систем: в этом методе, наряду с основным несущим тросом, устанавливается стабилизирующий (натяжной) трос, который может быть соединен с несущей системой посредством жестких распорок, гибких подвесок, или их комбинацией. Стабилизирующий трос может быть установлен выше или ниже несущего троса;

-Применение перекрестных систем: в данном подходе стабилизация достигается путем установки стабилизирующих тросов, расположенных поперек основных несущих тросов. Эти тросы формируют седловидную поверхность с отрицательной гауссовой кривизной, что помогает в распределении нагрузок;

-Использование жестких элементов в сочетании с гибкими вантами: жесткие элементы предназначены для стабилизации формы покрытия и равномерного распределения концентрированных и неравномерных нагрузок на несколько несущих вант;

-Применение висячих ферм и балок: жесткие ванты, такие как висячие фермы и балки, применяются для стабилизации покрытий с легкой кровлей, обеспечивая дополнительную прочность и устойчивость конструкции.

В целом, преимущества вантовых конструкций, такие как их легкость, экономичность и эстетическая выразительность, значительно превосходят их недостатки, что способствует их широкому применению в современном строительстве.

Вантовые конструкции можно классифицировать по различным признакам:

1. По расположению вант:

-С параллельным расположением: ванты расположены параллельно друг другу, поддерживая конструкцию по прямым линиям.

-С радиальным расположением: ванты расходятся от одной или нескольких центральных точек, образуя радиальные линии, что позволяет поддерживать конструкции с радиальной симметрией.

-С перекрестным расположением: ванты располагаются таким образом, что они пересекаются, образуя сетку или решетку, что увеличивает стабильность и жесткость конструкции.

2. По очертанию в плане:

-Прямоугольные: конструкции, имеющие прямоугольную форму в плане, что часто применяется для покрытия прямоугольных зданий или площадок.

-Круглые: вантовые конструкции, которые имеют круглое очертание в плане, что используется для создания куполов, шатров или других круглых форм.

-Комбинированные: конструкции, сочетающие различные формы в плане, например, прямоугольные с круглыми элементами, что позволяет создавать сложные и многофункциональные формы.

3. По методу стабилизации покрытия:

-За счёт увеличения массы покрытия или бетонными пригрузами: дополнительная масса или бетонные пригрузки используются для стабилизации покрытия, увеличивая его вес и прочность.

-Предварительным напряжением: ванты подвергаются предварительному натяжению, что обеспечивает дополнительную жесткость и устойчивость конструкции.

-Использованием элементов с изгибной жёсткостью: в конструкции используются

элементы, обладающие изгибной жесткостью, которые помогают стабилизировать покрытие и распределять нагрузки.

4. По способу восприятия усилий:

-Замкнутым опорным контуром: ванты поддерживаются по замкнутому контуру, что позволяет более эффективно распределять нагрузки и увеличивает устойчивость конструкции.

-Разомкнутым опорным контуром: Ванты поддерживаются по разомкнутому контуру, что может создавать определенные ограничения в распределении нагрузок и устойчивости конструкции.

5. По материалу несущих растянутых и контурных элементов:

-Линейные тросовые системы: используют тросы, которые работают в вертикальной плоскости, обеспечивая поддержку и распределение нагрузки в этой плоскости.

-Пространственные тросовые системы: Включают тросы, работающие в двух плоскостях, что позволяет им поддерживать более сложные и многогранные формы конструкции, обеспечивая пространственную жесткость и устойчивость.

Таким образом, классификация вантовых конструкций определяется большим разнообразием пространственных решений, связанных с их прочностными характеристиками. (Рисунок 1).



Рисунок 1. Классификация вантовых конструкций

Вантовые конструкции оказывают значительное влияние на визуальное восприятие зданий благодаря своей способности создавать выразительные и нестандартные формы, что достигается через несколько ключевых эстетических аспектов:

-Во-первых, легкость и воздушность, обеспечиваемая использованием натянутых тросов и минимальным количеством поддерживающих элементов, позволяет архитекторам проектировать открытые пространства и большие пролеты без видимой нагрузки на структуру;

- Во-вторых, эстетика прозрачности, достигаемая благодаря применению прозрачных или полупрозрачных материалов, таких как стекло или полимерные мембраны, усиливает визуальную легкость и создает эффекты освещенности;
- В-третьих, геометрическая выразительность вантовых систем позволяет реализовывать сложные формы и изогнутые линии, что придает зданиям уникальность и привлекательность, недостижимую традиционными конструктивными методами;
- Наконец, динамичность и движение, характерные для вантовых конструкций, способны визуально передавать энергетику и активность, что особенно актуально в проектах спортивных арен и культурных центров (Рисунок 2).

+



Рисунок 2. Визуальное восприятие вантовых конструкций

Развитие вантовых конструкций имеют долгую историю, уходящую корнями в древние времена, но их современное развитие началось в XIX веке. Первоначальные вантовые конструкции можно проследить с древних времен, когда подобные системы использовались в архитектуре и строительстве. Например, древние римляне и греки применяли примитивные версии натяжных систем для поддержания крыш и шатров. В средние века, хотя вантовые конструкции в их современном виде еще не существовали, в строительстве церквей и соборов использовались элементы, аналогичные принципам вантовых систем, такие как аркбутаны в готической архитектуре. Настоящий прорыв в развитии вантовых конструкций произошел в XIX веке с началом индустриальной революции.

Применение новых строительных материалов, таких как сталь и бетон, позволило создавать более сложные и масштабные конструкции. Очень интересные сведения о вантовых конструкциях, реализованных в проектах или натуре в XIX и XX веках, можно найти в книге Harris James B., Pui-K Li Kevin. *Masted Structures in Architecture*. – Taylor & Francis [5]. Одним из ранних примеров является построенный в 1859 году Лондонский мост через реку Темзу который стал знаковым примером применения стальных вант. (Рисунок 3). За долгую историю своего развития мосты прошли огромный путь от примитивных перекинутых через ручей брёвен до сооружений совершенно колоссального размера, которые перекрывают морские заливы шириною в десятки километров [6]. В книге

Морозов А.П., Василенко О.В., Миронков Б.А. отмечает, что до 1977 года только в СССР было построено свыше 120 зданий, перекрытых висячими конструкциями [7].

В XX веке вантовые конструкции достигли своего расцвета с развитием высокопрочных материалов и компьютерного моделирования. Одним из знаковых проектов стала крыша Олимпийского стадиона в Мюнхене, спроектированная Фрицем Хонекером и построенная в 1972 году, которая продемонстрировала возможности вантовых систем в создании крупных, легких и эстетически привлекательных покрытий. В это же время появляются новые архитектурные и инженерные решения, такие как вантовые мосты, покрытия для выставочных центров и спортивных арен, которые используют современные вантовые системы.



Рисунок 3. Лондонский мост через реку Темзу

Олимпийский стадион в Мюнхене, спроектированный Фраем Отто и Гюнтером Бенишем, является выдающимся примером использования вантовых конструкций в архитектуре. Его уникальная конструкция, построенная в 1972 году, продемонстрировала, что вантовые системы могут не только удовлетворять функциональным требованиям, но и создавать эстетически привлекательные общественные пространства (Рисунок 4).



Рисунок 4. Олимпийский стадион, г. Мюнхен

Стадион имеет вантовую конструкцию, в которой мембранная крыша поддерживается стальными канатами, что позволяет создавать большие пролёты без массивных опор. Открытость архитектурного пространства – важнейшее свойство стадиона. Естественную потребность визуальной связи, обеспечивающей ощущение единства с окружающим миром, отмечал Иконников А.В. [8]. Мембранная крыша, изготовленная из специальных синтетических материалов, не только обеспечивает защиту от погодных условий, но и способствует естественной вентиляции, что создаёт комфортные условия для зрителей и спортсменов. Олимпийский стадион в Мюнхене был спроектирован как многофункциональное пространство, способное проводить не только спортивные мероприятия, но и культурные события, такие как концерты и выставки. Футбольный стадион, благодаря масштабу, качеству архитектуры и социальной роли, оказывает решающее влияние на окружающую среду, обеспечивая единство пространственной композиции и определяя ансамблевый характер застройки [9]. Стадион стал символом объединения и культурного обмена, отражая дух Олимпийских игр 1972 года. Его открытая и инклюзивная структура приглашает людей всех возрастов и происхождений, способствуя социальному взаимодействию и единству. Наличие смотровых площадок и открытых пространств вокруг стадиона создает доступные места для отдыха и общения, что повышает качество жизни в городской среде.

Живописный мост в г. Москва — это вантовый мост через Москву-реку, который стал не только важной транспортной артерией, но и значимым элементом общественного пространства на северо-западе столицы. Построенный в 2001 году, мост демонстрирует возможности вантовых конструкций в создании функциональных и эстетически привлекательных объектов. Конструкция сооружения уникальна и состоит из огромной арки, являющейся опорой моста, к которой с помощью 72 тросов подвешено дорожное полотно, идущее не поперек, а вдоль реки, плавно изгибаясь и напоминая латинскую букву S [10]. (Рисунок 5.).



Рисунок 5. Живописный мост, г. Москва

Вантовая конструкция моста позволяет преодолевать значительные расстояния между берегами, обеспечивая надёжную поддержку верхней части моста. Ванта современного моста - это высокопрочный стальной трос, сплетённый из тысяч стальных проволок, работающих на растяжение [6]. Использование стальных канатов и опор придаёт дизайну

лёгкость и элегантность, что делает мост визуально привлекательным. Вантовые канаты можно отнести к бионике в архитектуре, что означает, прежде всего, подражание естественно природным формам, а в инженерном конструировании – моделирование при помощи современных материалов отдельных элементов конструкций по аналогии с внутренними структурами растений, животных и человека [11]. Мост служит важной транспортной артерией, соединяя различные районы города и облегчая передвижение жителей. Это значительно сокращает время в пути для автомобилистов и пешеходов. Пространство под мостом используется для организации прогулочных зон, что создает комфортные условия для отдыха и досуга. Таким образом, мост становится не только функциональным элементом инфраструктуры, но и местом для общественной активности.

Национальный центр исполнительских искусств в Пекине (2007), спроектированный архитектором Полом Андреу, является выдающимся примером вантовых конструкций, которые играют ключевую роль в создании общественных и культурных пространств. Открытый в 2007 году, этот архитектурный шедевр сочетает в себе инновационные технологии и эстетическую гармонию. Вантовая система поддерживает сложную оболочку здания, выполненную из титана и стекла, что позволяет создать легкую и прозрачную структуру, которая эффектно отражается в окружающем водоеме (Рисунок 6).



Рисунок 6. Национальный центр исполнительских искусств, г. Пекин

Прямоугольная форма водоема и овальная – здания должны, по замыслу архитектора Поля Андре, напоминать о древнем китайском космологическом символе Земли и Неба: вписанном в квадрат круге. [12] Идея Поля Андре заключалась в следующем: в центре города предполагалось создать огромное бассейн-озеро, а в его середине установить овальный приплюснутый купол, напоминающий каплю воды. Однако реализация проекта столкнулась с рядом трудностей. Первая проблема была связана с законодательством, ограничивающим высоту зданий в Пекине до 46 метров. Чтобы обойти это ограничение, фундамент углубили на 32 метра. Но и тут возникли сложности — под будущим зданием театра протекала подземная река, которая могла повредить конструкцию. Для решения этой проблемы фундамент заключили в водонепроницаемую бетонную оболочку толщиной 1 метр, а основание укрепили опорной плитой. Внутри здания располагаются три основных зала: большой концертный зал, театр и многофункциональный зал, что позволяет проводить широкий спектр культурных мероприятий, от оперных спектаклей

до выставок. Пространственная организация и акустические качества залов, обеспечиваемые вантовыми конструкциями, способствуют созданию уникальной атмосферы для зрителей и исполнителей. Центр стал важным культурным узлом в Пекине, активно способствующим развитию культурной жизни и социального взаимодействия в городе. Благодаря своей архитектуре и функциональности, Национальный центр исполнительских искусств демонстрирует, как вантовые конструкции могут не только улучшать функциональность зданий, но и создавать вдохновляющие общественные пространства.

Мост Хонг Конг — Чжухай — Макао, открытый в 2018 году, является выдающимся примером вантовой конструкции, играющей ключевую роль в создании общественного и культурного пространства. Длина моста превышает 55 километров, что делает его одним из самых протяжённых вантовых мостов в мире. Он обеспечивает соединение трёх регионов: Гонконга, Чжухая и Макао, существенно сокращая время в пути между ними и повышая транспортную доступность (Рисунок 7).



Рисунок 7. Мост Гонконг — Чжухай — Макао

Структура моста состоит из многочисленных вант, которые обеспечивают легкость и устойчивость конструкции. Применение современных материалов и технологий, таких как стальные канаты и бетонные опоры, позволило создать не только функциональный, но и визуально привлекательный объект, который органично вписывается в прибрежный ландшафт. Помимо своего основного транспортного назначения, мост стал символом сотрудничества и интеграции между регионами, способствуя социальным и культурным взаимодействиям. Следует отметить, что подобные конструкции являются результатом не столько строгих инженерных расчётов, сколько реализации творческого замысла, стремления к инновациям. Ведь вантовая конструкция обладает большим запасом технологической гибкости и вариативности своего решения [6].

Несмотря на преимущества вантовых систем, их внедрение в архитектурную практику требует учёта ряда ограничений и рисков, особенно в условиях сложной климатической среды. Одной из ключевых проблем является повышенная чувствительность таких конструкций к климатическим нагрузкам — снеговым заносам, порывистому ветру и температурным перепадам. Как показывают исследования, проведённые на примере торгово-развлекательного центра «Хан Шатыр» в Астане, для обеспечения надёжной работы вантовой системы в условиях континентального климата требуется внедрение проектных решений, таких как предварительное напряжение тросов, использование

коррозионностойких материалов и герметичных мембранных оболочек [13]. Недостаточное внимание к этим аспектам может повлечь за собой неравномерное распределение нагрузок, ускоренное старение материала и рост эксплуатационных затрат. А также, вантовые конструкции требуют регулярного технического контроля и корректировки натяжения, что увеличивает стоимость жизненного цикла сооружения. Таким образом, технико-экономические характеристики подобных конструкций должны оцениваться не только на этапе строительства, но и с учётом их долгосрочной эксплуатации [13]. В связи с вышеперечисленными негативными аспектами вантовых конструкций и соответственно высокой стоимостью их строительства и эксплуатации, данные конструктивные системы должны применяться в создании крупных уникальных сооружений, таких как: олимпийские стадионы, торгово-развлекательные комплексы, выставочные павильоны, мосты и т.п.

Наряду с конструктивными и эстетическими функциями, вантовые конструкции оказывают значительное влияние на социальное восприятие и использование архитектурного пространства. Их способность формировать открытые и гибкие зоны способствует интеграции различных видов активности и повышает инклюзивность городской среды. Например, в исследовании, посвящённом проектированию навесов для общественных зон, установлено, что навесы с вантовыми покрытиями повышают продолжительность пребывания людей в открытых пространствах, стимулируя как индивидуальные, так и групповые формы взаимодействия [14]. Анализ реализованных объектов — таких как Олимпийский стадион в Мюнхене или Национальный центр исполнительских искусств в Пекине — демонстрирует, что архитектура с применением вантовых систем становится катализатором культурной активности, создавая условия для проведения массовых мероприятий и неформального общения. Таким образом, вантовые конструкции могут рассматриваться как инструменты пространственной интеграции, влияющие на качество жизни, социальную сплочённость и культурную идентичность города.

Заключение

В ходе проведенного исследования была проанализирована существенная роль подвесных конструкций в формировании общественных и культурных пространств, подчеркнув их потенциал не только как технических решений, но и как элементов, формирующих социальное взаимодействие. Было установлено, что вантовые конструкции не только эстетичны, но и обеспечивают функциональную гибкость, которая способствует интеграции различных видов социальной и культурной деятельности. Анализ примеров успешного использования вантовых конструкций в архитектуре выявил основные аспекты, которые способствуют созданию инклюзивных и многофункциональных пространств. Мы пришли к выводу, что применение вантовых систем может существенно повысить доступность и адаптивность общественных пространств, что, в свою очередь, приводит к повышению их социальной ценности и культурной значимости. Основываясь на полученных данных, можно сказать, что вантовые конструкции являются важным инструментом для архитекторов и градостроителей при проектировании общественных и культурных пространств. Также мы отметили необходимость проведения дальнейших исследований в данной области, включая аспекты устойчивости, инновационных материалов и технологий, а также социального влияния таких пространств на сообщества.

Таким образом, наше исследование подчёркивает актуальность использования вантовых конструкций как способа создания динамичных и привлекательных общественных пространств, которые открывают новые возможности для взаимодействия и культурного обмена. В будущем стоит обратить внимание на разнообразие способов использования этих конструкций в различных контекстах, что позволит расширить их функциональность и влияние на общество.

Вклад авторов

Ақжігіт Н.Ж. - внесла значительный вклад в разработку концепции и критический пересмотр его содержания. Она определила основные направления исследования вантовых конструкций и их влияние на создание общественных и культурных пространств. Провела анализ существующих примеров применения вантовых систем в архитектуре, что позволило сформулировать ключевые выводы и рекомендации.

Садыкова С.Ш. - внесение значительного вклада в разработку концепции и критический пересмотр его содержания, утверждение окончательного варианта статьи для публикации, надлежащее изучение и решение вопросов, связанных с достоверностью данных или целостностью всех частей статьи.

Список литературы

1. Агеева Е.Ю., Спиридонова А.И. Особенности применения вантовых конструкций в зрелищных зданиях: учебн. пос. для вузов / Е.Ю. Агеева, А.И. Спиридонова; Нижегород. гос. архит.-строит. ун-т – Н. Новгород: ННГАСУ, . 2015- 79 с. – учебное пособие
2. Кужахметова, Э. Р. Архитектурная выразительность и физиологическая целесообразность зданий с криволинейными поверхностями / Э. Р. Кужахметова, А. И. Сапожников // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. - Москва: ООО "Композит XXI век", 2012. - №11 (166). - С. 42-45. – научная статья
3. Кирсанов, Н. М. Висячие и вантовые конструкции: учеб. пособие для вузов / Н. М. Кирсанов. - Москва: Стройиздат, 1981.-158. с., ил. – книга
4. Хитрук С.А. Особенности и применение вантовых конструкций / «Научно-практический электронный журнал Аллея Науки» 2020. Т. 1. № 5 (44). С. 329-333. – электронный журнал
5. Harris James B., Pui-K Li Kevin. Masted Structures in Architecture. – Taylor & Francis, 1996. – 160 p. – книга на англ. языке DOI: <https://doi.org/10.4324/9780080572208>
6. М.М. Амосков, Перспективы развития вантовых мостов / «Перспективы Науки» №7(09). 2010. С. 24-31. – научная статья
7. Морозов А.П., Василенко О.В., Миронков Б.А. Пространственные конструкции общественных зданий. Л.: Стройиздат, 1977. 168 с. – книга
8. Иконников А.В., Степанов Г.П. Основы архитектурной композиции. М.: Искусство, 1971. 224с. – книга
9. Океанов Г.В. Адаптация архитектурных решений большепролетных светопрозрачных покрытий футбольных стадионов России к работе в режиме "Наследие" / Промышленное и гражданское строительство. 2019. № 5. С. 4-13. –

- научная статья DOI:<https://doi.org/10.33622/0869-7019.2019.05.04-13>
10. Дедюрина Е.П. Вантовые конструкции в архитектуре и строительстве / В сборнике: Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова, посвященная 170-летию со дня рождения В.Г. Шухова. Сборник докладов. Белгород, 2023. С. 76-81. – научная статья
 11. Демченко А.И. Вантовые конструкции// в сборнике: Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. 2014. С. 199-202. – научная статья
 12. Кулагина Т.О., Климова А.А., Агеева Е.Ю. Купола-оболочки в бионической архитектуре на примере большого национального театра в Пекине // Материалы X Международной студенческой научной конференции «Студенческий научный форум» <https://scienceforum.ru/2018/article/2018004515> - материалы конференций
 13. Erçin Ç., Nurumova K. (2020). Influence of the climate on large scale cable structures: A case study of Khan Shatyr entertainment center in Astana, Kazakhstan. International Journal of Advanced and Applied Sciences, 7(4) – научная статья на англ. языке DOI: <https://doi.org/10.21833/ijaas.2020.04.010>
 14. Kayan H.Z., Sazlı E.G. (2023). Suspended-Tensile Structure Based Installations in Open Public Spaces. Tasarım + Kuram, 19(40) – научная статья на англ. языке DOI: <https://doi.org/10.59215/tasarimkuram.405>

Н.Ж. Ақжігіт*, С.Ш.Садыкова

Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан

Қоғамдық және мәдени кеңістіктерді құрудағы аспалы құрылымдардың рөлі

Аңдатпа. Аспалы конструкциялар қоғамдық және мәдени кеңістіктерді құруда шешуші рөл атқаратын заманауи архитектуралық дизайнның маңызды элементін білдіреді. Аспалы конструкциялар еркіндік пен жеңілдік атмосферасын құра отырып, тірек элементтерінің минималды саны бар кең және ашық аймақтарды құруға мүмкіндік береді. Бұл мақалада аспалы жүйелердің қоғамдық және мәдени кеңістіктердің функционалдығы мен эстетикасын дамытуға әсері, сондай-ақ олардың сәулеттік формаларды қалыптастырудағы рөлі қарастырылады. Зерттеудің мақсаты бірегей және тиімді қоғамдық кеңістіктерді құру үшін аспалы конструкцияларды пайдаланудың ерекшеліктері мен артықшылықтарын талдау болып табылады. Мақала архитектурада аспалы жүйелерді сәтті қолданудың теориялық аспектілерін де, практикалық мысалдарын да қарастырады. Зерттеу қолданыстағы жобаларды талдауға, әртүрлі конструктивті шешімдерді салыстыруға және аспалы жүйелердің теориялық аспектілерін зерттеуге негізделген. Негізгі нәтижелер аспалы конструкциялар функционалдылық пен тұрақтылық тұрғысынан да тиімді ашық және эстетикалық тартымды кеңістіктерді құруға ықпал ететінін көрсетеді. Зерттеудің маңыздылығы аспалы жүйелерді қолдану және олардың қоғамдық мақсаттағы объектілердің архитектурасындағы мүмкіндіктері туралы білімді кеңейту болып табылады. Бұл жұмыстың практикалық маңыздылығы қоғамдық кеңістіктерді құрудағы аспалы құрылымдардың мүмкіндіктерін терең түсіну және көрсету

болып табылады.

Түйін сөздер: аспалы құрылымдар, қоғамдық кеңістіктер, архитектуралық дизайн, функционалдылық, эстетика.

N.Zh Akzhigit*, S.Sh.Sadykova

L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan

The role of cable-stayed structures in the creation of public and cultural spaces

Abstract. Cable-stayed structures represent an important element of modern architectural design, playing a key role in the creation of public and cultural spaces. Cable-stayed structures provide the opportunity to create spacious and open areas with a minimum number of supporting elements, which creates an atmosphere of freedom and lightness. This article examines the influence of cable-stayed systems on the development of functionality and aesthetics of public and cultural spaces, as well as their role in the formation of architectural forms. The purpose of the study is to analyze the features and advantages of using cable-stayed structures to create unique and effective public spaces. The article discusses both theoretical aspects and practical examples of successful application of cable-stayed systems in architecture. The research is based on an analysis of existing projects, a comparison of various design solutions and a study of the theoretical aspects of cable-stayed systems. The main results show that cable-stayed structures contribute to the creation of open and aesthetically attractive spaces, which are also effective in terms of functionality and sustainability. The importance of the research lies in expanding knowledge about the use of cable-stayed systems and their capabilities in the architecture of public facilities. The practical significance of this work lies in an in-depth understanding and demonstration of the possibilities of cable-stayed structures in creating public spaces.

Keywords: cable-stayed structures, public spaces, cultural objects, architectural design, sustainability, functionality, aesthetics.

References

1. Ageeva E.Yu., Spiridonova A.I. Features of the use of cable-stayed structures in spectacular buildings: educational settlement for universities / E.Yu. Ageeva, A.I. Spiridonova; Nizhny Novgorod State University - He's building. University of Nizhny Novgorod: NNGASU, 2015- 79 p. - textbook [in Russian].
2. Kuzhakhmetova, E. R. Architectural expressiveness and physiological expediency of buildings with curved surfaces / E. R. Kuzhakhmetova, A. I. Sapozhnikov // Building materials, equipment, technologies of the XXI century. - Moscow: Composite XXI Century LLC", 2012. - №11 (166). - Pp. 42-45. – scientific article [in Russian].
3. Kirsanov, N. M. Hanging and cable-stayed structures: textbook. handbook for universities / N. M. Kirsanov. - Moscow: Stroyizdat, 1981.-158. p., ill. – book [in Russian].
4. Khitruk S.A. Features and application of cable-stayed structures / "Scientific and practical electronic journal Alley of Science" 2020. Vol. 1. No. 5 (44). pp. 329-333. – electronic journal [in Russian].
5. Harris James B., Pui-K Li Kevin. Mastered Structures in Architecture. – Taylor & Francis, 1996.

- 160 p. – book in English DOI: <https://doi.org/10.4324/9780080572208>
6. M.M. Amoskov, Prospects for the development of cable-stayed bridges / "Prospects of Science" No.7(09). 2010. pp. 24-31. - scientific article [in Russian].
 7. Morozov A.P., Vasilenko O.V., Mironkov B.A. Spatial structures of public buildings. L.: Stroyizdat, 1977. 168 p. – book [in Russian].
 8. Ikonnikov A.V., Stepanov G.P. Fundamentals of architectural composition. Moscow: Iskusstvo, 1971. 224c. – book [in Russian].
 9. Okeanov G.V. Adaptation of architectural solutions of large-span translucent coverings of football stadiums in Russia to work in the "Heritage" mode/ Industrial and civil engineering. 2019. No. 5. pp. 4-13. – scientific article DOI: <https://doi.org/10.33622/0869-7019.2019.05.04-13> [in Russian].
 10. Dedyurina E.P. Cable-stayed structures in architecture and construction / In the collection: International scientific and technical Conference of young scientists of V.G. Shukhov BSTU, dedicated to the 170th anniversary of the birth of V.G. Shukhov. Collection of reports. Belgorod, 2023. pp. 76-81. – scientific article [in Russian].
 11. Demchenko A.I. Cable-stayed structures// in the collection: International scientific and technical conference of young scientists of V.G. Shukhov BSTU. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. 2014. pp. 199-202. – scientific article [in Russian].
 12. Kulagina T.O., Klimova A.A., Ageeva E.Y. Dome-shells in bionic architecture on the example of the Grand National Theater in Beijing // Proceedings of the X International Student Scientific Conference "Student Scientific Forum" <https://scienceforum.ru/2018/article/2018004515> - conference materials [in Russian].
 13. Erçin Ç., Nurumova K. (2020). Influence of the climate on large scale cable structures: A case study of Khan Shatyr entertainment center in Astana, Kazakhstan. International Journal of Advanced and Applied Sciences, 7(4) – научная статья на англ. языке DOI: <https://doi.org/10.21833/ijaas.2020.04.010>
 14. Kayan H.Z., Sazlı E.G. (2023). Suspended-Tensile Structure Based Installations in Open Public Spaces. Tasarım + Kuram, 19(40) – научная статья на англ. языке DOI: <https://doi.org/10.59215/tasarimkuram.405>

Сведения об авторах:

Ақжігіт Н.Ж. – автор по корреспонденции, магистрант 2-го курса, Архитектурно-строительный факультет, Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, ул. Сатпаева, 2, Астана, Казахстан.

Садыкова С.Ш. – Почетный архитектор РК, кандидат архитектуры, ассоциированный профессор, кафедра «Архитектура», Архитектурно-строительный факультет, Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, ул. Сатпаева, 2, Астана, Казахстан.

Ақжігіт Н.Ж. – хат-хабар авторы, 2-ші курс магистранты, Сәулет-құрылыс факультеті, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Сәтбаев к-сі, 2, Астана, Қазақстан.

Садықова С.Ш. – ҚР құрметті сәулетшісі, сәулет кандидаты, ассоц. профессоры, «Сәулет» кафедрасы, сәулет-құрылыс факультеті, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Сәтбаев к-сі, 2, Астана, Қазақстан.

Akzhigit N.Zh. – – corresponding author, 2nd year Master's student, faculty of Architecture and Civil

Engineering, L.N. Gumilyov Eurasian National University, 2 Satpaeva str., Astana, Kazakhstan.
Sadykova S.Sh. – honorary architect of the Republic of Kazakhstan, candidate of architecture,
associate professor, department of Architecture, faculty of Architecture and Civil Engineering, L.N.
Gumilyov Eurasian National University, 2 Satpaeva str., Astana, Kazakhstan.



Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).



МРНТИ 67.07.01

Научная статья

<https://doi.org/10.32523/2616-7263-2026-154-1-102-114>

Особенности развития торговых объектов города Астаны

Д.Е.Сарсембаева 

Евразийский национальный университет имени Л.Н.Гумилева, Астана, Казахстан

E mail: sarsembayeva_dye_1@enu.kz

Аннотация. В исследовании рассмотрены примеры торговых объектов города Астаны. При изучении сферы услуг важным является рассмотрение торгово-развлекательных центров города. В современных торгово-развлекательных центрах осуществляются торговые и культурно-досуговые процессы. Данное совмещение функций представляет сложность в их размещении в городе и последующем развитии. Полноценный процесс обслуживания в торгово-развлекательном центре возможен при создании комфортных условий для посетителей и персонала. В свою очередь это требует учета климатических, транспортных, социальных условий. Целью исследования является выявление особенностей развития торговых объектов социальной инфраструктуры в городе Астане. Актуальность исследования связана с изучением особенностей развития торгово-развлекательных центров. В процессе исследования проанализированы зарубежные примеры торгово-развлекательных центров. В методологии данной работы важное место занимает изучение расположения торгово-развлекательных центров по представленной схеме. Также вопрос был изучен в трудах зарубежных и отечественных ученых разного направления. Результатом работы является выявление особенностей развития торгово-развлекательных центров для улучшения их доступности населению городских районов: развитие вдоль главных магистралей; строительство в новых районах; наличие лучшего доступа к данным учреждениям для населения Левого берега. Практическая значимость работы состоит в необходимости проектирования торгово-развлекательных учреждений с учетом выявленных особенностей в современных условиях.

Ключевые слова: объекты торговли, торгово-развлекательный центр, микрорайон, социальная инфраструктура, городские районы, общественные центры

Введение

Количество учреждений торговли ежегодно увеличивается. Данные объекты социальной инфраструктуры в планировочной структуре города имеют важное значение. В процессе исторического развития стало необходимым размещение торговых учреждений в пределах повседневного радиуса обслуживания. В настоящее время объект социальной инфраструктуры - торгово-развлекательный центр является общественным зданием с большим количеством функций. Симбиоз нескольких направлений сферы услуг в одном здании позволяет создать благоприятные условия для торговли. Многообразие сфер услуг влияет на увеличение количества посетителей. Структурными единицами планировочной структуры города Астаны являются административно-территориальные районы и микрорайоны. В административно-территориальных городских районах Астаны ежегодно фиксируется увеличение численности населения. Данный момент отражается на повышении нагрузки на объекты социальной инфраструктуры. Нехватка мест в учреждениях обслуживания показывает важность обеспечения достаточного количества объектов [1]. Современная система обслуживания должна учитывать функциональные зоны для проживания населения, отдыха и работы.

В здании торгово-развлекательных центров наряду с торговыми функциями сосредотачиваются дополнительные смежные функции. В планировочной структуре города данные здания приобретают важное значение. Благодаря сочетанию разных сфер обслуживания, данный тип общественных зданий имеет тенденцию к новшествам и изменениям. В структурной единице города, как городской район существует ежедневная потребность в объектах торговли. Этим обусловлено проектирование торгово-офисных помещений в части встроенных помещений жилых комплексов и других зданий.

Торгово-офисные помещения на первом этаже являются важнейшей частью городской улицы, определяющим городские пространства и служащими зонами взаимодействия между людьми и местами. В городских пространствах является важным создание гармоничной среды жилых и общественных зданий. Организация такой территории связана с озеленением, дорогами, тротуарами, что влияет на физическое и психическое здоровье населения. Взаимосвязь зданий и пространств отражает гармоничное соотношение объектов в системе обслуживания [2].

В ходе исследования посещаемости магазинов было установлено, что пространственный коэффициент витрин магазинов, коэффициент глубины витрин магазинов и пространственная связность торговых площадей оказывают положительное влияние на пространственную жизнеспособность городских территорий [3,4].

Территориальный рост города актуализирует проблему изменений жилых и общественных зданий в пределах структурных единиц. Городские районы охватывают большую площадь городской застройки с жилыми и общественными зданиями. Возрастание населения в каждом микрорайоне ставит задачи поиска экологичных и транспортных решений. Также в структуре городов Северного Казахстана важно учесть фактор климата [5-8]. Многофункциональные здания могут рассматриваться, как здания для торговли и проведения досуга.

В крупных городах увеличивается население, что ведет к росту количества районов. Для каждого района города не учтено наличие торгово-развлекательного центра, что приводит к транспортной загруженности. Развлекательные центры отдалены и расположены не равномерно. Также центры не равноценны по составу представленных

услуг.

В настоящее время возрастает потребность в услугах торговых центров. Центры в городах перестают быть объектами с эпизодической частотой пользования. Данные объекты под воздействием отдельных сопутствующих факторов на территории районов могут быть восприимчивы к потребностям конкретного района города. Данными отличительными факторами могут быть необходимость учреждений фитнеса, парикмахерской, выставочных галерей. Также закономерным процессом является учет исторически сложившихся связей между зданиями и перспектива их развития.

Актуальность изучения данных особенностей состоит в необходимости анализа изменения значения торгово-развлекательных центров в городе, изучения вопросов их расположения в научной литературе разного направления, в практике градостроительного проектирования городов и их районов.

Цель данного исследования – рассмотреть и определить современные аспекты развития торгово-развлекательных центров в структурных единицах города Астаны. В ходе работы рассматриваются административно-территориальные районы, изучаются торгово-развлекательные центры в городе Астане.

Значение данной работы состоит в рассмотрении особенностей проектирования объектов социальной инфраструктуры сферы торговли. Важной частью работы является внимание к вопросам ежедневных и эпизодических уровней обслуживания.

Методология

В работе изучается современное состояние торговых объектов в планировочной структуре города Астаны. Торгово-развлекательные центры являются объектами социальной инфраструктуры, которые способны отражать современные изменения в потребностях населения. Методология исследования отражает изучение данных:

- изучение торгово-развлекательных центров города Астаны;
- рассмотрение данных исследований зарубежных и отечественных авторов;
- статистический анализ данных, позволяющий выявить наличие торговых объектов социальной инфраструктуры;
- схематический анализ расположения торгово-развлекательных центров в городских административных районах города, который позволил выявить особенности развития объектов.

Результаты и Обсуждение

В структурных единицах города развивается проектирование современных зданий, как торгово-развлекательные центры. Данные торговые учреждения социальной инфраструктуры могут располагаться, как в отдельно стоящих зданиях так и в составе встроенных этажей жилых комплексов. Объекты торговли (магазины) являются учреждениями повседневного обслуживания. Это связано с возможностью сосредотачивать большое количество населения на основе ежедневных потребностей населения.

Активное развитие рыночной экономики в 90-ые годы привело к росту количества частных торговых учреждений, увеличению объема розничной торговли, росту ассортимента и качества товаров. В период с 1991 года с обретением независимости Республики Казахстан стали больше возводиться торговые объекты, для которых характерна

многофункциональность [9,10]. На территории городских микрорайонов строились торговые дома с широким ассортиментом товаров. В составе торговых домов на территории микрорайона присутствовали столовые, аптеки, парикмахерские и другие отделы продажи товаров. Данные объекты позволяли приблизить объекты обслуживания для населения, так как были сосредоточены в одном здании. Рост населения города обусловил появление таких объектов во многих районах города. Расположение торговых учреждений в составе микрорайонов приближает объекты населению. Уменьшение частоты передвижения населения на большие расстояния исключает загруженность транспортных направлений.

Расположение в составе одного здания магазинов одежды, кафе, супермаркета, кинотеатра, фитнеса, салонов красоты, автомойки показало важность многофункциональности учреждений. Многофункциональные объекты способны развивать разные сферы услуг в компактном микрорайоне и территориально-развитом городском районе.

С начала 2000 годов в городе построены торгово-развлекательные центры - объекты с большой площадью. В городских районах представлены следующие торговые объекты: "Керуен сити" (2007г.), "Керуен" (2008г.), "Хан Шатыр" (2010г.), "Mega Silk Way" (2017г.), "Сарыарка" (2008г.), "Азия парк" (2009г.), МФК "Абу-Даби Плаза" (2022г.), "Евразия" (1999г.), "Аружан" (2012г.), "Astana Mall" (2012г.).

Торгово-развлекательные центры отличаются включением услуг сферы развлечений, как кинотеатр, игровые, боулинг, фудкорты. Во время сезонных перепадов температур торговые центры предоставляют возможности для досуга. Широкий спектр товаров и услуг в пределах здания создает условия для проведения досуга и совершения покупок. Атриумное пространство торгово-развлекательных центров вмещает большое количество людей и создает комфортные условия пребывания.

При рассмотрении городских структурных единиц отмечаются ключевые особенности развития торгово-развлекательных центров: социальные, градостроительные, рекреационные, транспортные, климатические.

Потребность в ежедневном посещении торговых объектов - характерная особенность, выделяющая универсальность данных учреждений. В структуре городского обслуживания выделяются торговые объекты социальной инфраструктуры разных сфер услуг.

На территории города Астана присутствует розничная торговля в составе жилых комплексов во встроенных помещениях первых этажей и в отдельно-стоящих зданиях. Ключевым моментом выступает постоянное развитие розничной торговли во всех микрорайонах. В пространстве районов и микрорайонов существует розничная торговля на основе пространств торгово-развлекательного центра, развитие вдоль главных магистралей и развитие в составе рынков.

В данной статье исследуется развитие торгово-развлекательных центров в городе Астаны. При рассмотрении торгово-развлекательных центров обозначено группирование данных зданий в городских районах Есиль, Нура и Алматы.

В структурных единицах города Астана развиваются крупные торгово-развлекательные центры. В городском районе Есиль находятся объекты - ТРЦ "Mega Silk Way", ТРЦ "Керуен", МФК "Абу-Даби Плаза". В городском районе Нура находятся ТРЦ "Хан Шатыр", ТРЦ "Азия парк", ТРЦ "Сарыарка", ТРЦ "Керуен сити". В городском районе Алматы находятся: ТРЦ "Евразия", ТРЦ "Аружан", ТРЦ "Astana Mall". В городском районе Сарайшык

находится - ТРЦ "Даму".

В планировочной структуре городского района Есиль размещена пешеходная зона Водно-зеленого бульвара. Данная планировочная ось эспланады обустроена фонтанами, цветниками, деревьями и скамейками.

Территория Водно-зеленого бульвара охватывает пешеходные пути, связывающие торгово-развлекательные центры ТРЦ "Керуен", ТРЦ "Хан Шатыр", ТРЦ "Азия парк", ТРЦ "Сарыарка". Данные связи образуют пешеходные зоны, которые располагают к комфортному досугу особенно в летнее время. Параллельно к бульвару расположена главная улица Сарайшык, улица Сыганак, улицы Д.Конаева и Достык. Население, проживающее в данных участках города, обладают широким доступом к услугам торгово-развлекательных центров.

Однако при исследовании остальных городских районов города Астаны отмечается следующее: сосредоточение объектов в районе Есиль и Нура; отсутствие торгово-развлекательных центров в городских районах Сарыарка и Байконур. На территории района Сарайшык открыт ТРЦ "Даму". Крупные торгово-развлекательные центры не охватывают городские районы города. Сезонные перепады температуры выявляют отдаленное расположение объектов. В теплое время года передвижение может быть более комфортным. Доступность торговых объектов снижается при необходимости преодолевать большие расстояния.

Экологический аспект проектирования.

В осуществлении доступного обслуживания населения города торгово-развлекательными центрами необходимо выделить важность условий совершения покупок и проведение досуга.

Включение в пространство торгово-развлекательных центров элементов ландшафтного дизайна является приемом повышения комфортности в эксплуатации здания. В городском пространстве отдельно-расположенные торговые объекты необходимо связать с окружающей средой озеленением и открытым садом.

В исследовании рассмотрено развитие зданий торговли на территории Левобережной части города вдоль Водно-зеленого бульвара. Развитие планировочной структуры города показывает связь направлений Водно-зеленого бульвара, линейного парка, ботанического сада и Экспо парка. Сформированные рекреации дополняют функциональные возможности торгово-развлекательных центров. Пространства поддерживают устойчивое развитие города. В свою очередь эстетика и комфорт города способствуют развитию туристической отрасли.

Территория городских районов города Астаны располагает наличием зон рекреаций, которые способствуют основанию пешеходных связей между общественными зданиями. Наличие рекреации и общественных зданий на территории Левого берега по планировочной оси в двух направлениях позволяет реализовать пространственные связи в структуре города. В каждом из пространственных участков спроектированы визуальные ориентиры, как Хан Шатыр, Байтерек, Здание Экспо.

По планировочной оси Водно-зеленый бульвар расположены четыре торгово-развлекательных центра. Необходимо отметить, что данные пешеходные связи объединяют общественные и жилые объекты. Учитывая рекреации можно улучшить комфортность обслуживания. Это одновременно улучшает доступность процесса совершения покупок и условия досуга.

Климатический аспект планирования

Резко-континентальный климат города Астаны показывает невозможность круглогодичного использования открытых пространств. В планировочном решении, атриум торгово-развлекательного центра располагает к организации мероприятий, как презентации, ярмарки и встречи.

В холодное время года торгово-развлекательные центры предоставляют возможности к проведению досуга, что важно учитывать при развитии в городских районах. Радиус доступности торговых объектов важен для населения.

Транспортный аспект проектирования.

Расположение торговых центров в каждом из планировочных городских районов способно стать основой к обеспечению доступного обслуживания. Одним из примеров является размещение МФК "Абу-Даби Плаза". В здании предусмотрены выходы по направлению к станции LRT.



Рисунок 1. Схема пешеходно-прогулочных зон

Примечание: составлено на основании данных [2,4,6,15]

В составе торгово-развлекательных центров нужно предусматривать остановки общественного транспорта и LRT. Интеграция таких функциональных зон способно увеличить комфорт и количество покупателей. В особенности данный критерий влияет на

доступность учреждений для населения.

Социальный аспект проектирования.

Роль торгово-развлекательных центров ежегодно меняется. Досуг взрослого человека в будние дни зависит от времени, так как занятость не располагает к продолжительным прогулкам. Горожане ежедневно посещают продовольственные магазины. Расход времени на данные направления может быть сокращен при концентрации данных сфер в едином здании. Торгово-развлекательные центры планируют значительную площадь для фудкорта, индустрию развлечений (кинотеатры, боулинги, детские игровые). Розничная торговля охватывает меньше внутренних пространств [11,12].

При изучении торговых центров зарубежных стран выявлена смена предпочтений посетителей. В 2000 - ые годы торгово-развлекательные центры предназначались для покупок и общения с друзьями. После периода активного развития онлайн покупок и общения в мессенджерах роль торговых центров меняется. Современные условия показывают, что важно учесть образ жизни человека, которому важно его время.

Согласно проведенному опросу среди трех возрастных групп населения было установлено следующее:

- Подростки посещают торговые центры для походов в кинотеатр и рестораны, просмотр покупок с возможностью дальнейшей покупки в интернете;
- Молодежь рассматривает торговый центр, как место покупок, фитнеса и походов в рестораны в обеденное время;
- Взрослое население подчеркивает традиционное значение торгового центра, как удобства совершения покупок непосредственно на месте.
- Планировочный аспект проектирования.
- При проектировании торгово-развлекательных центров вдоль пешеходных зон, важно создавать самостоятельные входы в каждый из отделов первого этажа. Примеры проектирования показывают, что приверженность этому приему за рубежом помогает вовлечь посетителей в сопутствующие сферы услуг. Одновременно подход раскрывает пространства для удобства посетителей и продаж.

Организация процесса совершения покупок и досуга позволяет эффективно распределить время. Удобство для населения заключается в предоставлении данных видов услуг в одном здании. Рост населения города повышает роль торгово-развлекательных центров в образовании общественных центров.

С развитием онлайн покупок стало необходимо менять архитектурно-планировочное решение и площади торговых объектов, а именно их наполнение [13-15]. Меняется розничное предложение города, которое должно адаптироваться к меняющимся потребительским и досуговым привычкам. Доступность объектов в границах городского района приближает сферы услуг.

Розничная продажа наряду с сопутствующим досугом в торгово-развлекательном центре зависит от следующих аспектов, которые важно учитывать в проектировании:

1. возникновение в образе крытых улиц, где есть рынки и другие сферы услуг, что складывается в результате исторического развития центров городов;
2. размещение на основе рекреационных зон;
3. интеграция транспортного сообщения ;
4. изменение социальной роли торгового центра, как возможности совершения покупок и

проведения досуга;

5. формирование торговых объектов вдоль улиц во встроенных первых этажах (рисунок 1).

В результате исследования объектов социальной инфраструктуры выявлено, что торговые объекты являются учреждениями ежедневного пользования, что выделяет их универсальную роль в формировании центров. Развитие торгово-развлекательных центров на участках рекреации важно для создания пешеходных связей.

Для эффективной организации обслуживания необходимо формировать транспортные и пешеходные связи между зданиями, которые становятся основой под развитие структуры городского района и города в целом. Современная роль объектов наряду с торговой функцией состоит в организации досуга. Рассмотрение сложившейся структуры позволяет выделить особенности развития. Экологические, транспортные и социальные аспекты отражают важные градостроительные решения, которые учитывают проблемы с разных ракурсов.

Изучение особенностей показывает важность торговых объектов в системе обслуживания города, с учетом организации процесса покупок и досуга населения.

Заключение

Развитие торгово-развлекательных центров в современных условиях зависит от учета особенностей развития торговых зданий в городе. Пример Водно-зеленого бульвара и линейного парка показывает благоприятную роль пешеходно-прогулочной зоны при связи жилых и общественных зданий. При расположении здания торгово-развлекательного центра в рекреации увеличивается пешеходная доступность здания, создаются условия для досуга и покупательской активности населения. Выполнение связи жилых и общественных зданий важно для вовлечения потоков туристов и населения, что повышает доступность торговых центров. Данные микрорайоны Левобережья связаны композиционной осью, которую поддерживают здания многофункционального назначения.

Особое значение имеет повышение доступности данных объектов в течении дня, а также рабочие и выходные дни. Территория города характеризуется наличием пешеходных зон, что создает условия для комфортного проживания населения и работы.

В структурных единицах города учет особенностей способствуют образованию общественного центра. В планировочной структуре города данные исследования позволяют повысить пешеходную доступность торгово - развлекательных центров.

В городских районах города необходимо учитывать сочетание торгово - развлекательных центров с территорией рекреации, располагая их на данных участках. Прогулочно-пешеходные зоны должны включать территории, вдоль которых располагаются большинство общественных зданий наряду с жильем.

Вклад авторов

Сарсембаева Д.Е. – концепция, идея, модель и дизайн исследования, сбор и анализ данных, интерпретация результатов работы, написание текста, критический пересмотр его содержания, утверждение окончательной версии.

Список литературы

1. Тоскина В. В. Эволюция архитектурно-планировочной структуры. : На примере

- Акмолинской области: автореферат дис...кандидата архитектуры: 18.00.01.Новосиб. гос.архитектур.-худож.акад. - Новосибирск, 2002. - 28 с. - Автореферат диссертации
2. H. Lian, X. Li, W. Zhou et al. Pedestrian vitality characteristics in pedestrianized commercial streets-considering temporal, spatial, and built environment factors // *Frontiers of Architectural Research*,14, 630-653 (2025), DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foar.2024.10.006>- журнал на англ.языке
 3. Lian, H., Li, G., 2023. Correlation analysis of retail space and shopping behavior in a commercial street based on space syntax: a case of shijiazhuang, China // *Buildings* 13 (11), 2674,2-32 (2023), <https://doi.org/10.3390/buildings13112674>- журнал на англ.языке
 4. Чекаев Ф.М. Истоки и эволюция архитектуры Астаны (Акмолы) 1830-1991 годов: автореферат дис... канд. Архитектуры:18.00.01. Казахский национальный технический университет им. К. И. Сатпаева. - Алматы, 2009. - 30 с. - Автореферат диссертации
 5. Kornilova A.A., Khorovetskaya Ye.M., Sarsembayeva D.Ye. et al. Territory Management: Urban Planning and Recreational Planning of Populated Areas in the Republic of Kazakhstan in the Second Half of the 20th Century // *Journal of Environmental Management and Tourism*, 10(6), 1295-1302 (2019), DOI: [https://doi.org/10.14505//jemt.v10.6\(38\).11](https://doi.org/10.14505//jemt.v10.6(38).11)- журнал на англ.языке
 6. Sarsembayeva D.Ye., Kornilova A.A., Zhaksylykova L. A., Kiseleva T. A. Features of the Social Infrastructure Formation of Astana City // *Civil Engineering and Architecture* 11(3): 1234-1244, 2023 DOI: 10.13189/cea.2023.110309- журнал на англ.языке
 7. Luis Alfonso Escudero-Gómez. Shopping centers challenging decline: Competitive strategies in three case studies from Madrid's urban area // *Journal of Retailing and Consumer Services* 79(3):103826, (2024), DOI:10.1016/j.jretconser.2024.103826- журнал на англ.языке
 8. Туякаева А.К., Данибекова Э.Т., Абдрасилова Г.С., Онищенко Ю.В. Региональная идентичность в архитектуре жилой застройки 1930-1990-х гг. города Караганда// *QazBSQA Хабаршысы. Сәулет. -2023.-№4 (90)-С.62-76.* <https://doi.org/10.51488/1680-080X/2023.4-05>- журнал
 9. Abdrasilova G., Danibekova E., Tuyakayeva A., Syzdykova A. Architecture of Almaty in the 20thcentury: in search of cultural identity// *QazBSQA Хабаршысы, Сәулет.- 2024.-4(94)-С.8-23.*<https://doi.org/10.51488/1680-080X/2024.4-01> - журнал
 10. Kuspangaliyev B.U., Samoilov K.I., O.N. Priemets. The spatial development of the Khoja Ahmed Yasawi complex in Turkestan features// *QazBSQA Хабаршысы. Сәулет және Құрылыс.-2024. 2 (92).-С.122-135.,* <https://doi.org/10.51488/1680-080X/2024.2-09> - журнал
 11. Воронцова Ю.С. Эволюция приемов создания коммерческой привлекательности российских торговых центров // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук. Социальные, гуманитарные, медико-биологические науки.-2017.- №. 19, №2.-С.63-67. - журнал*
 12. Воронцова, Ю. С. Оптические иллюзии как визуальный акцент в пространстве крупных торговых центров // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук. Социальные, гуманитарные, медико-биологические науки.-2017.- т.19, №3.-С.66-69. - журнал*
 13. Каракова Т.В. Архитектура и дизайн городской среды в контексте изменения

- пространственного поведения жителей мегаполисов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. Социальные, гуманитарные, медико-биологические науки.-2023.- № 25, № 2 (89).-С.64-69. - журнал
14. Каракова Т.В. Урбанизация и ресурсный потенциал Российского мегаполиса в контексте средового подхода в градостроительстве // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. Социальные, гуманитарные, медико-биологические науки.-2019.- т. 21, №68.-С.43-47. - журнал
15. Каракова Т.В. Функционально-пространственная модель развития торговой функции в городе // Известия Самарского научного центра Российской академии наук.-2015.- т. 17, №1(2).-С.491-493 - журнал

Д.Е.Сарсембаева

Л.Н.Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан

Астана қаласының сауда объектілерінің даму ерекшеліктері

Аннотация. Бұл зерттеу Астанадағы бөлшек сауда нысандарының мысалдарын қарастырады. Қызмет көрсету саласын зерттеген кезде қаланың сауда және ойын-сауық орталықтарын ескеру маңызды. Қазіргі заманғы сауда және ойын-сауық орталықтары бөлшек сауда және мәдени-демалыс іс-шараларын да қамтиды. Бұл функцияларды біріктіру олардың қала ішінде орналасуында және одан әрі дамуында қиындықтар туғызады. Орталықта қызмет көрсету тек келушілер мен қызметкерлер үшін қолайлы жағдайлар жасау арқылы мүмкін болады. Бұл климаттық, көліктік және әлеуметтік жағдайларды ескеруді талап етеді. Зерттеудің мақсаты - Астанадағы әлеуметтік инфрақұрылым шеңберіндегі бөлшек сауда нысандарының даму ерекшеліктерін анықтау. Зерттеудің өзектілігі сауда және ойын-сауық орталықтарының даму ерекшеліктерін зерттеуде жатыр. Зерттеуде сауда және ойын-сауық орталықтарының халықаралық мысалдары қарастырылады. Бұл жұмыстың әдіснамасы ұсынылған схемаға сәйкес сауда және ойын-сауық орталықтарының орналасуына баса назар аударады. Бұл мәселе әртүрлі салалардағы шетелдік және отандық ғалымдардың еңбектерінде зерттелген. Зерттеудің нәтижесі - қала халқына қолжетімділікті жақсарту үшін сауда және ойын-сауық орталықтарының даму ерекшеліктерін анықтау: негізгі магистральдар бойындағы құрылыс; жаңа аудандарда құрылыс; Сол жағалау тұрғындары үшін осы мекемелерге қолжетімділік. Жұмыстың практикалық маңыздылығы - қазіргі заманғы жағдайларда анықталған ерекшеліктерді ескере отырып, сауда және ойын-сауық нысандарын жобалау қажеттілігі.

Түйін сөздер: бөлшек сауда нысандары, сауда және ойын-сауық орталықтары, шағын аудандар, әлеуметтік инфрақұрылым, қалалық аумақтар, қоғамдық орталықтар.

D.Y.Sarsembayeva

L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Republic of Kazakhstan

Features of the development of retail facilities in Astana

Abstract. This study examines examples of retail facilities in Astana. In the service sector, shopping and entertainment centers are an important consideration. Shopping and entertainment centers combine retail, cultural, leisure functions, which influences their location and development. Service within the center depends on creating conditions for visitors and staff. This requires consideration of climatic, transport, and social conditions. The purpose of this study is to identify the development characteristics of retail facilities in Astana. The relevance of this research lies in studying the development characteristics of shopping and entertainment centers. The study examined the development of international facilities. The methodology includes studying the location of facilities according to the presented diagram. This issue has been studied by foreign and domestic researchers in various fields. The results of this study revealed the characteristics of shopping and entertainment center development: development along major highways and in new areas; accessibility of facilities for residents of the Left Bank. The practical significance lies in the need to design shopping and entertainment centers taking into account the identified characteristics.

Keywords: retail facilities, shopping and entertainment centers, microdistricts, social infrastructure, urban areas, community centers.

References

1. Toskina V. V. Jevoljucija arhitekturno-planirovochnoj struktury naselennyh punktov Severnogo Kazahstana v XIX-XX vv. : Na primere Akmolinskoj oblasti : avtoreferat dis. ... kandidata arhitektury : 18.00.01 [Evolution of the architectural planning structure of settlements in Northern Kazakhstan in the 19th-20th centuries] (Novosibirsk, 2002. 28 p.) [in Russian]
2. H. Lian, X. Li, W. Zhou et al. Pedestrian vitality characteristics in pedestrianized commercial streets-considering temporal, spatial, and built environment factors // *Frontiers of Architectural Research*, 14, 630-653 (2025), DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foar.2024.10.006>
3. Lian, H., Li, G., 2023. Correlation analysis of retail space and shopping behavior in a commercial street based on space syntax: a case of shijiazhuang, China // *Buildings* 13 (11), 2674,2-32 (2023), <https://doi.org/10.3390/buildings13112674>
4. Chekaev F. M. Istoki i jevoljucija arhitektury Astany (Akmoly) 1830—1991 gody: avtoreferat dissertacii na soiskanie uchenoj stepeni kandidata arhitektury: 18.00.01 [Origins and evolution of the architecture of Astana (Akmola) 1830-1991] (Almaty, 2009. 30 p.) [in Russian]
5. Kornilova A.A., Khorovetskaya Ye.M., Sarsembayeva D.Ye. et al. Territory Management: Urban Planning and Recreational Planning of Populated Areas in the Republic of Kazakhstan in the Second Half of the 20th Century // *Journal of Environmental Management and Tourism*, 10(6), 1295-1302 (2019), DOI: [https://doi.org/10.14505//jemt.v10.6\(38\).11](https://doi.org/10.14505//jemt.v10.6(38).11)
6. Sarsembayeva D.Ye., Kornilova A.A., Zhaksylykova L. A., Kiseleva T. A. Features of the Social Infrastructure Formation of Astana City // *Civil Engineering and Architecture* 11(3), 1234-1244 (2023) DOI: 10.13189/cea.2023.110309

7. Luis Alfonso Escudero-Gómez. Shopping centers challenging decline: Competitive strategies in three case studies from Madrid's urban area // Journal of Retailing and Consumer Services 79(3):103826, (2024), DOI:10.1016/j.jretconser.2024.103826
8. Tuyakaeva A.K., Danibekova E.T., Abdrasilova G.S., Onishchenko Yu. Regional'naya identichnost' v arkhitekture zhiloi zastrojki 1930-1990-kh gg. goroda Karaganda [Regional identity in the architecture of residential buildings in the 1930s-1990s of the city of Karaganda] QazBSQA Habarshysy. [Saulet]. 4(94).62-76(2023). <https://doi.org/10.51488/1680-080X/2023.4-05> [in Russian]
9. Abdrasilova G., Danibekova E., Tuyakayeva A., Syzdykova A. Architecture of Almaty in the 20th century: in search of cultural identity // QazBSQA Habarshysy. [Architecture]. 4(94).8-23(2024). <https://doi.org/10.51488/1680-080X/2024.4-01>
10. Kuspangaliyev B.U., Samoilov K.I., O.N. Priemets.(2024). The spatial development of the Khoja Ahmed Yasawi complex in Turkestan features // QazBSQA Habarshysy. [Architecture and construction]. 2 (92). 122-135(2024). <https://doi.org/10.51488/1680-080X/2024.2-09>
11. Voroncova Yu.S. Evolyuciya priemov sozdaniya kommercheskoj privlekatel'nosti rossijskih torgovyh centrov [The evolution of techniques for creating commercial attractiveness of Russian shopping malls] Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk.Social'nye, gumanitarnye, mediko-biologicheskie nauki. [Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. Social Sciences, Humanities, Medical and Biological Sciences]. №. 19, №2. 63-67(2017). [in Russian]
12. Voroncova Yu.S. Opticheskie illjuzii kak vizual'nyj akcent v prostranstve krupnyh torgovyh centrov [Optical illusions as a visual accent in the space of large shopping malls] Izvestija Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk. Social'nye, gumanitarnye, mediko-biologicheskie nauki. [Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. Social Sciences, Humanities, Medical and Biological Sciences]. 19. №3. 66-69(2017). [in Russian]
13. Karakova T.V. Arhitektura i dizajn gorodskoj sredy v kontekste izmeneniya prostranstvennogo povedeniya zhitelej megapolisov [Architecture and design of the urban environment in the context of changing spatial behavior of residents of megacities] Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk.Social'nye, gumanitarnye, mediko-biologicheskie nauki. [Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. Social Sciences, Humanities, Medical and Biological Sciences]. 25. № 2 (89). 64-69(2023). [in Russian]
14. Karakova T.V. Urbanizacija i resursnyj potencial Rossijskogo megapolisa v kontekste sredovogo podhoda v gradostroitel'stve [Urbanization and Resource Potential of the Russian Megalopolis in the Context of the Environmental Approach in Urban Planning] Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk.Social'nye, gumanitarnye, mediko-biologicheskie nauki. [Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. Social Sciences, Humanities, Medical and Biological Sciences]. 21. №68.43-47(2019). [in Russian]
15. Karakova T.V. Funkcional'no-prostranstvennaja model' razvitija torgovoj funkcii v gorode [Functional and spatial model of the development of the trade function in the city]. Izvestija Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk. [Proceedings of the Samara

Scientific Center of the Russian Academy of Sciences]. 17. №1(2). 491-493(2015). [in Russian]

Сведения об авторах:

Сарсембаева Д.Е. – автор для корреспонденции, доктор PhD по специальности "Архитектура", и.о.доцент кафедры "Архитектура", Архитектурно-строительный факультет, Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, 10000 Республика Казахстан г. Астана, ул. Кажымукана, 13, учебный корпус №6

Sarsembayeva D. Ye. – corresponding author, Doctor PhD in the specialty "Architecture", Acting Associate Professor, Department of Architecture, Faculty of Architecture and Civil Engineering, Eurasian National University. L.N. Gumilyov, 10000 Republic of Kazakhstan, Astana, st.Kazhymukan, 13, educational building No. 6

Сарсембаева Д.Е. – хат-хабар авторы, "Сәулет"мамандығы бойынша PhD докторы, доцент м.а., "Сәулет" кафедрасы, Сәулет-құрылыс факультеті, Еуразия ұлттық университеті. Л. Н. Гумилева, 10000 Қазақстан Республикасы, Астана қ., Қажымұқан к-сі, 13



Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).



МРНТИ 73.37

Научная статья

<https://doi.org/10.32523/2616-7263-2026-154-1-115-131>

Математическое моделирование подготовки авиационного персонала в сфере обеспечения безопасности полетов

Н.А. Долженко , О.В. Гармаш 

«Академия Гражданской Авиации» Алматы, Республика Казахстан

E mail: ¹n.dolzhenko@agakaz.kz, ²o.garmash@agakaz.kz

Аннотация. Современное развитие гражданской авиации сопровождается усложнением организационно-технических систем, ужесточением требований обеспечения безопасности полётов. Актуальность исследования обусловлена необходимостью повышения эффективности образовательных программ подготовки авиационного персонала за счёт применения методов математического моделирования, позволяющих оптимизировать процессы профессиональной подготовки с учётом требований безопасности. Предметом исследования являются процессы подготовки авиационного персонала в контексте обеспечения безопасности полётов. Задачи исследования включают анализ существующих подходов к организации подготовки, разработку математической модели, учитывающей профессиональные компетенции, параметры безопасности, а также внешние и внутренние факторы, влияющие на учебный процесс. Целью работы является построение и апробация математической модели, позволяющей оценить и оптимизировать процесс подготовки авиационного персонала. В исследовании использованы методы системного анализа, теории управления, математического моделирования и имитационного моделирования. Для демонстрации работы модели приведён числовой пример; его результаты носят иллюстративный характер на основе эмпирических данных, позволяющих определить ключевые параметры, оказывающие наибольшее влияние на эффективность подготовки. Результаты работы демонстрируют возможность количественной оценки влияния различных факторов на уровень профессиональной готовности персонала. Полученные выводы позволяют формировать рекомендации по корректировке образовательных программ, ответственных за безопасность полётов.

Ключевые слова: авиационный персонал; безопасность полётов; профессиональная подготовка; математическое моделирование;

Поступила 29.09.2025. Доработана 24.02.2026. Принята 27.02.2026. Доступна онлайн 30.03.2026

* автор по корреспонденции

Введение

Высокие требования к профессиональной деятельности авиационного персонала, обеспечивающего безопасность полётов, обуславливают необходимость формирования устойчивой профессиональной надёжности, включающей комплексную интеграцию мотивационных, когнитивных, эмоциональных, физических и психофизиологических характеристик, определяющих качество выполнения профессиональных функций. Формирование данных характеристик начинается на этапе профессионального самоопределения личности и достигает своего наибольшего развития в процессе получения высшего профессионального образования. Поддержание и развитие профессиональной надёжности требует поиска эффективных методических подходов и организационно-педагогических ресурсов профессиональной подготовки, максимально учитывающих специфику профессиональной деятельности авиационных специалистов.

Обострение данной проблемы обусловлено множеством факторов. Во-первых, специфика профессиональной деятельности авиационного персонала предъявляет высокие требования к состоянию здоровья, физической подготовке, эмоциональной устойчивости и способности функционировать в условиях высокой интенсивности труда. Во-вторых, необходим высокий уровень профессиональной компетентности, включающий фундаментальные теоретические знания, сформированные практические навыки и способность к оперативному усвоению новой информации. В-третьих, профессиональная деятельность сопряжена с высокой психофизиологической нагрузкой, повышающей вероятность возникновения стрессовых состояний, что требует от специалистов владения методами саморегуляции и поддержания психофизиологической устойчивости в экстремальных условиях.

Развитие современных информационно-коммуникационных технологий создало предпосылки для совершенствования технических средств обучения, включая создание современных тренажёрных комплексов, моделирующих как динамику полёта, так и окружающую среду. Применение данных технологий стало важным элементом системы подготовки, обеспечивая её адаптивность и повышение качества профессиональной подготовки авиационного персонала. Применение инновационных интегрированных учебно-тренировочных систем позволяет существенно повысить эффективность образовательного процесса, минимизировать количество профессиональных ошибок и повысить надёжность профессиональной деятельности.

Анализ статистических данных автоматизированных систем обеспечения безопасности полётов свидетельствует о высокой концентрации авиационных происшествий в зоне аэродромной деятельности при выполнении операций руления, взлёта, захода на посадку и посадки воздушных судов. Значительная доля (около 14%) летных происшествий связана с выкатыванием воздушного судна за пределы взлётно-посадочной полосы [1]. Указанные данные подтверждают актуальность разработки и совершенствования подходов к оценке уровня подготовки авиационного персонала как на этапе первоначальной профессиональной подготовки, так и в ходе последующего повышения квалификации.

Сложность исследуемой проблемы определяется многофакторностью профессиональной деятельности авиационных специалистов, необходимостью учёта взаимодействия и взаимовлияния различных факторов. В связи с этим предлагается применение математического аппарата нечетких когнитивных карт (НКК),

обеспечивающего возможность адекватного моделирования сложных динамических систем, опирающихся на качественные экспертные оценки.

Использование нечетких когнитивных карт позволяет репрезентировать сложные динамические процессы в форме, наиболее приближенной к особенностям человеческого восприятия и анализа [2]. К преимуществам данного метода относятся:

- включение в модель обратных связей;
- учёт большого количества переменных с нечеткими значениями;
- моделирование взаимосвязей между переменными при наличии неопределённости;
- использование экспертных знаний при ограниченности точных эмпирических данных;
- высокая скорость построения моделей и получения аналитических результатов;
- возможность интеграции разнородной информации в единую когнитивную структуру;
- оперативная оценка различных сценариев развития управленческих решений.

Применение НКК позволяет реализовать принцип несовместимости между сложностью системы и ограниченностью точности исходной информации, обеспечивая при этом системный анализ сложных профессионально-образовательных процессов. Междисциплинарный характер данного подхода формирует основу для комплексного изучения проблем подготовки авиационного персонала в сфере обеспечения безопасности полётов [2].

Методология

Математическое моделирование процесса оценки уровня подготовки пилотов гражданской авиации предполагает формализацию рассматриваемых процессов путём выделения ограниченного числа наиболее значимых факторов с одновременным абстрагированием от переменных, влияние которых в заданных условиях может быть признано несущественным [3]. В этой связи при формировании множества концептов в настоящем исследовании предлагается учитывать факторы, непосредственно связанные с процессом профессиональной подготовки пилотов гражданской авиации, обладающие как стимулирующим, так и сдерживающим воздействием на его динамику (см. табл. 1).

Учет перечисленных факторов в процессе математического моделирования позволяет более полно и объективно оценивать уровень профессиональной готовности пилотов, а также разрабатывать оптимальные управленческие решения в системе профессиональной подготовки авиационного персонала [4].

Факторы, приведённые в таблице 1 (возраст, образование, наличие судимостей, вредные привычки и др.), интегрированы в состав концептов модели С1–С7 и учитываются при построении нечеткой когнитивной карты.

Следует отметить, что в настоящее время не существует универсальной методологии для определения перечня факторов, влияющих на исследуемый процесс. В рамках настоящей работы единственным источником информации для идентификации и формализации критериев выступает экспертная оценка автора, сформулированная на естественном языке и основанная на совокупности профессиональных представлений, накопленного опыта, практических знаний и интуитивного восприятия исследуемой проблематики.

Таблица 1 - Факторы, влияющие на процесс профессиональной подготовки пилотов гражданской авиации [4]

Наименование фактора	Положительное влияние	Отрицательное влияние
Возраст	20–35 лет	Старше 35 лет
Уровень образования	Высшее образование	Среднее образование
Успеваемость по точным наукам	Высокая успеваемость по физике и математике в процессе обучения	Средняя либо низкая успеваемость по физике и математике
Наличие судимостей	Отсутствие судимостей по административным или уголовным правонарушениям	Наличие административных или уголовных судимостей
Вредные привычки	Отсутствие вредных привычек (зависимостей)	Наличие вредных привычек (зависимостей)
Владение иностранными языками	Наличие сертификатов о знании одного или нескольких иностранных языков	Отсутствие подтверждённых знаний иностранных языков
Пилотажный опыт	Наличие опыта пилотирования воздушных судов гражданской авиации соответствующего класса	Отсутствие соответствующего практического опыта
Командные навыки	Наличие опыта управленческой деятельности	Отсутствие опыта управленческой деятельности
Обучаемость	Успешное усвоение профессиональных знаний, умений и навыков	Необходимость повторного прохождения обучения
Коммуникативные навыки	Высокий уровень взаимодействия с членами экипажа и обслуживающим персоналом	Низкий уровень взаимодействия с коллегами
Лидерские качества	Высокий уровень лидерских качеств	Низкий уровень лидерских качеств или их отсутствие
Стрессоустойчивость	Высокий уровень стрессоустойчивости	Уровень ниже среднего

Такой подход частично расходится с методологическими принципами моделирования, предложенными Ф. Ланкастером. В частности:

- уравнения Ф. Ланкастера изначально не предназначены для работы с экспертными суждениями, которые в настоящем исследовании являются основным источником информации при построении модели в условиях неопределенности;
- параметры эффективности, заложенные в формализм уравнений, требуют наличия значительного объёма статистических данных, которые, как правило, труднодоступны либо вызывают сомнения в их достоверности [5].

Для решения задачи оценки уровня профессиональной подготовки пилотов гражданской авиации предлагается использовать метод построения нечеткой когнитивной карты (НКК), отражающей взаимосвязи и напряжённость между различными

факторами. Основанием для построения НКК выступает математический аппарат теории нечетких множеств и нечеткой логики, являющихся обобщением классической теории множеств и бинарной логики. Согласно определению Б. Козко, нечеткая когнитивная карта представляет собой ориентированный граф, в котором вершины (концепты) соответствуют переменным модели, а дуги — взаимосвязям между ними, количественно выраженным с помощью нечетких терминов. Вес дуг отражает интенсивность причинно-следственных воздействий одних переменных на другие. Термин «когнитивная» подчеркивает, что в качестве исходных данных для построения модели используются субъективные экспертные оценки, описывающие силу воздействия в терминах «увеличивается» либо «уменьшается». Атрибут «нечеткая» указывает на использование шкалы количественной оценки интенсивности воздействий в интервалах $[0; 1]$ и $[-1; 0]$, что позволяет дифференцировать уровни изменений, обозначаемых как низкий, средний, высокий и др., согласно принципам теории нечетких множеств [6].

Применение теории нечетких множеств обеспечивает возможность формального описания качественно неопределённых понятий, обработки неполных и субъективных знаний, а также построения нечетких выводов. В отличие от классической логики, в нечеткой логике истина характеризуется не бинарной оценкой, а степенью истинности, принимающей значения в непрерывном интервале от 0 до 1.

Ключевым понятием, применяемым в рамках настоящего исследования, является «ранжирование» (англ. ranging, ranking, rating), под которым понимается упорядочивание исследуемых факторов по степени их значимости или влияния. В контексте данной работы — это формирование упорядоченного перечня факторов, способствующих снижению качества профессиональной подготовки пилотов гражданской авиации. Само ранжирование рассматривается авторами как задача многокритериального анализа в условиях неопределенности.

В качестве методологической базы для решения поставленной задачи используются теория принятия решений в нечетких средах, разработанная Р. Беллманом и Л. Заде (Bellman & Zadeh, 1970) [7], а также концепция нечеткой перфектности, изложенная в работах А. Ротштейна. В качестве аналогичных примеров подхода можно привести исследования В. Корниенко и А. Ротштейна, посвящённые альтернативно-возможному выбору политических партий в условиях электоральной неопределенности [8].

Методика использования нечетких когнитивных карт включает в себя процедуру построения и применения нечеткой когнитивной карты (НКК) и состоит из нескольких этапов.

Формализация концептов. Пусть имеется конечное множество концептов $C = \{C_1, C_2, \dots, C_n\}$, отражающих совокупность переменных, принимаемых в качестве составляющих модели рассматриваемой динамической системы. В рамках настоящего исследования каждому концепту C_i сопоставляется числовое значение x_i , устанавливаемое на основе экспертной оценки. При этом предполагается, что $x_i \in [x_i^{\min}, x_i^{\max}]$, где x_i^{\min} и x_i^{\max} — соответственно нижняя и верхняя границы допустимого диапазона изменения значений концепта C_i .

Определение связей между концептами. Связи между концептами моделируются посредством ориентированных дуг, каждая из которых характеризуется весом w_{ij} ,

отражающим силу и характер воздействия концепта C_i на концепт C_j . Величина w_{ij} интерпретируется следующим образом:

- $w_{ij} > 0$ — положительное влияние: увеличение (уменьшение) значения переменной C_i приводит к увеличению (уменьшению) значения переменной C_j ;
- $w_{ij} < 0$ — отрицательное влияние: увеличение (уменьшение) значения переменной C_i приводит к уменьшению (увеличению) значения переменной C_j ;
- $w_{ij} = 0$ — отсутствие влияния: изменение значения C_i не оказывает воздействия на значение C_j .

Оценка силы влияния. Степень влияния связей w_{ij} устанавливается на основании экспертных суждений с использованием системы лингвистических переменных и соответствующей шкалы (термометрической шкалы), представленной в таблице 2. Такой подход позволяет формализовать качественные оценки силы связей между концептами в числовые значения для последующего математического анализа [8].

Таблица 2 - Лингвистическая шкала оценки силы влияния концептов в модели НКК [9]

Лингвистическая оценка	Числовое значение (интервал)	Характеристика воздействия
Очень сильное положительное влияние	+0.8 ÷ +1.0	Максимально усиливающее воздействие
Сильное положительное влияние	+0.6 ÷ +0.8	Существенно усиливающее воздействие
Среднее положительное влияние	+0.4 ÷ +0.6	Умеренно усиливающее воздействие
Слабое положительное влияние	+0.2 ÷ +0.4	Незначительное усиливающее воздействие
Практически отсутствующее влияние	-0.2 ÷ +0.2	Влияние отсутствует или незначительно
Слабое отрицательное влияние	-0.4 ÷ -0.2	Незначительное ослабляющее воздействие
Среднее отрицательное влияние	-0.6 ÷ -0.4	Умеренно ослабляющее воздействие
Сильное отрицательное влияние	-0.8 ÷ -0.6	Существенно ослабляющее воздействие
Очень сильное отрицательное влияние	-1.0 ÷ -0.8	Максимально ослабляющее воздействие

В случае привлечения нескольких экспертов для проведения оценивания, итоговое значение силы воздействия определяется как среднее арифметическое индивидуальных оценок, предоставленных каждым из экспертов.

Рекуррентное соотношение (от лат. *recurrens* — возвращающийся) представляет собой функциональную зависимость вида:

$$x_{t+1} = F(x_t, x_{t-1}, \dots, x_{t-k+1}) \quad (1)$$

где F — функция от k аргументов, позволяющая определять очередной член последовательности на основе значений предыдущих членов. Таким образом, рекуррентное соотношение однозначно задаёт последовательность $\{x_t\}$, при условии, что даны значения первых k её членов. Подобные соотношения позволяют описывать динамическое поведение моделируемых систем, включая колебательные процессы, возникающие при взаимодействии концептов в рамках нечётких когнитивных карт (НКК).

Для формализации влияний между концептами в НКК используется матрица весов $W=\{w_{ij}\}$, элементы которой w_{ij} отражают силу воздействия концепта C_i на концепт C_j . При этом диагональные элементы матрицы принимают нулевые значения:

$$w_{ii} = 0, \quad \forall i, \quad (2)$$

что соответствует отсутствию самовлияния концептов на самих себя.

$$W_0 = \begin{bmatrix} 0 & w_{12} & \dots & w_{1n} \\ w_{21} & 0 & \dots & w_{2n} \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ w_{n1} & w_{n2} & \dots & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Начальное состояние НКК, определяемая вектором:

$$X^0 = [x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0] \quad (4)$$

элементы которого равны значению концептов на шаге $k = 0$.

Стационарное состояние НКК, определяемая вектором:

$$X^l = [x_1^l, x_2^l, \dots, x_n^l] \quad (5)$$

На некотором шаге итерационного процесса l , в результате взаимодействия между концептами, модель нечёткой когнитивной карты (НКК) достигает стационарного состояния, при котором значения элементов вектора состояния

$$X^{(l)} = (x_1^{(l)}, x_2^{(l)}, \dots, x_n^{(l)}) \quad (6)$$

прекращают изменяться, то есть наступает установившийся режим функционирования системы.

Динамика пошагового изменения значений концептов описывается рекуррентным соотношением $x_i^{k+1} = x_i^k + \sum_{j=1}^n (x_j^k - x_j^{k-1}) w_{ji}$, которое может быть представлено в матричной форме [9]:

$$X^{k+1} = X^k \oplus (X^k - X^{k-1}) W_0, \quad X^1 = X^0 \oplus X^0 W_0 \quad (7)$$

где W — матрица весов взаимных воздействий между концептами, а символы « \oplus » и « \ominus » обозначают операции поэлементного сложения и вычитания векторов соответственно, которые осуществляются по следующим правилам:

$$(a \oplus b) = \min(a+b, 1), (a \ominus b) = \max(a-b, 0), \quad (8)$$

Эти операции обеспечивают ограничение итоговых значений вектора состояния в пределах унифицированного интервала $[0; 1]$.

Прогнозирование значения целевой (исходной) переменной осуществляется в рамках системы типа «вход — выход», где рассматривается концепт C_y в качестве выходной переменной, а все остальные концепты $\{C_1, C_2, \dots, C_{y-1}, C_{y+1}, \dots, C_n\}$ — в качестве входных факторов, оказывающих взаимное влияние. Соответственно, алгоритм прогнозирования значения выходной переменной реализуется следующим образом: [...]

Шаг 1. Установить исходное состояние НКК (4)

$$X^0 = [x_1^0, x_2^0, \dots, x_{n-1}^0, x_n^0 = 0], x_i \in [x_i, \bar{x}_i]. \quad (9)$$

Шаг 2. Пользуясь рекуррентным соотношением (7), вычислить вектор (6) значений концептов в стационарном (устойчивом) состоянии.

Шаг 3. В полученном векторе (6) зафиксировать значение x_n^j и считать его прогнозом \hat{x}_n выхода, соответствующего заданному входному вектору (9).

Ранжирование концептов. Ранговая оценка концептов, выступающих в качестве входных переменных, позволяет количественно определить их значимость в контексте влияния на выходную переменную модели. Методика ранжирования концептов в рамках нечётких когнитивных карт представлена в работе [8].

Индекс важности каждого отдельного входного концепта C_i определяется величиной x_u , рассчитанной для вектора состояния

$$X = (x_1, x_2, \dots, x_i = 1, \dots, x_n = 0), \quad (10)$$

где значение анализируемого концепта C_i устанавливается на верхнем уровне принадлежности (единичное значение), а значения остальных входных концептов принимаются на нижнем уровне (нулевое значение).

В качестве целевой (выходной) переменной модели выбран концепт C_6 — «Базовый уровень теоретической подготовки, знаний и практических умений» пилота. Ранговая оценка входных концептов C_1 – C_5 и C_7 выполняется с помощью вектора состояния, где единичное значение присваивается анализируемому концепту, а остальные принимают нулевое значение, что позволяет количественно оценить его влияние на целевой концепт C_6 .

Таким образом моделируется изолированное влияние каждого концепта на выходную переменную.

Аналогичным образом могут быть вычислены индексы совокупного (интегрального) влияния различных комбинаций входных концептов на целевую переменную путём соответствующего варьирования начальных условий вектора состояния.

Результаты и Обсуждение

Предлагаемая структура нечёткой когнитивной карты (НКК), отражающая модель процесса оценки уровня подготовки пилотов гражданской авиации, представлена на рисунке 1.

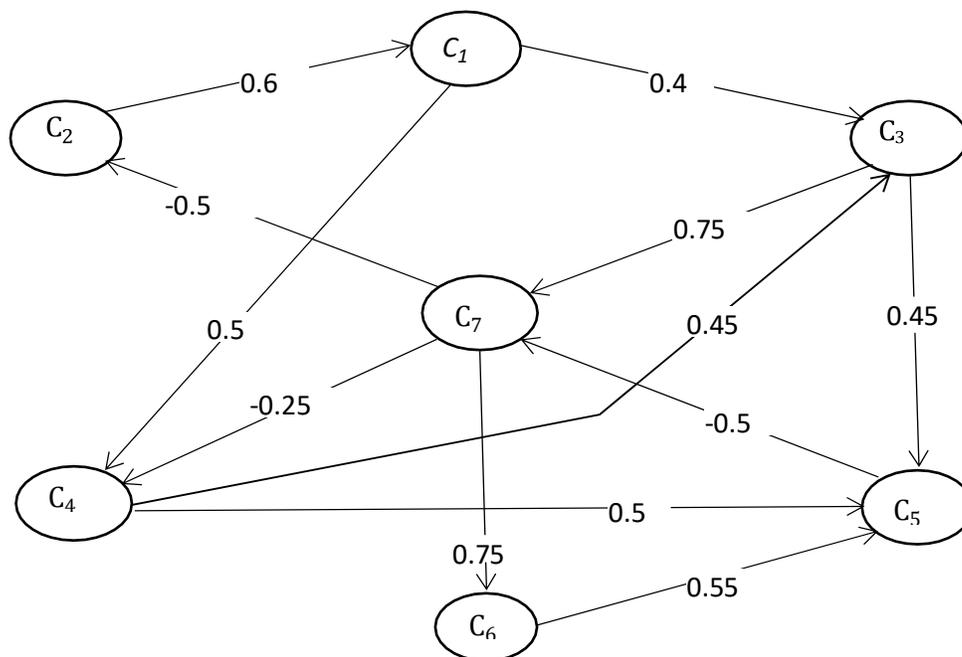


Рисунок 1. НКК процесса подготовки пилотов ГА

Примечание: составлено на основании данных [9]

Концепты, соответствующие вершинам представленного графа, систематизированы в таблице 3 с указанием интервалов возможных значений соответствующих переменных. Следует подчеркнуть, что приведённый перечень концептов не претендует на исчерпывающий характер и отражает авторскую интерпретацию структуры профессиональной подготовки пилотов гражданской авиации на основе существующих теоретических и эмпирических представлений. Вместе с тем предложенные концепты обладают высокой конструктивной значимостью в рамках построения рассматриваемой нечёткой когнитивной карты и формируют основу для последующего математического анализа и моделирования.

Отбор концептов осуществлялся с учётом семантического анализа лексических единиц, наиболее часто встречающихся в интервью опытных пилотов, посвящённых профессиональным рискам, возникающим в условиях интенсивных эксплуатационных нагрузок, включая экстремальные, кризисные и конфликтные ситуации в авиационной деятельности [9].

Следует особо отметить, что в соответствии с данными таблицы 2, интервальные оценки отдельных концептов C_i варьируются в зависимости от их содержательной специфики. Различие диапазонов значений обусловлено природой соответствующих

факторов, а также степенью их влияния на процесс профессиональной подготовки пилотов, что учитывается при последующем формализованном моделировании и аналитической обработке.

Таблица 3. Характеристика концептов нечеткой когнитивной карты [9]

Концепт	Описание параметра	Диапазон оценивания
C1	Индивидуально-психологические характеристики пилота гражданской авиации	[0; 1]
C2	Практический опыт управления воздушными судами	[0; 1]
C3	Эффективность взаимодействия с членами экипажа и техническим персоналом	[0; 1]
C4	Организационно-деловые и управленческие компетенции пилота	[0; 1]
C5	Когнитивная способность к усвоению и адаптации новых знаний и навыков	[0; 1]
C6	Базовый уровень теоретической подготовки, знаний и практических умений	[0; 1]
C7	Владение иностранными языками на профессиональном уровне	[0; 1]

В таблице 3 указан диапазон оценивания концептов [0;1], который используется для нормализации значений при построении нечеткой когнитивной карты. Таблицы 5 и 6 отражают промежуточные этапы экспертной оценки, где применялись относительные баллы: максимальное значение 50 в таблице 5 соответствует полной шкале влияния концептов на оценку их значимости, а максимальное значение 25 в таблице 6 — промежуточная шкала для отдельных подкомпонентов оценки. После обработки и усреднения экспертных оценок все значения нормализуются к диапазону [0;1] для последующей работы с матрицей W и построения когнитивной карты.

Качественные параметры, подлежащие учету при экспертной оценке каждого из концептов, а также соответствующие силы их воздействия, систематизированы в таблице 4.

Структурная схема нечеткой когнитивной карты представлена на рисунке 1. Величины весов дуг графа, отражающих интенсивность взаимного влияния концептов, определены на основе экспертных оценок с применением параметров, приведённых в таблице 3.

Таблица 4. Параметры, используемые при экспертной оценке уровня концептов [9]

Концепт	Характеризующие факторы
C1	<ul style="list-style-type: none"> • внутренняя мотивация к профессиональной деятельности; • развитые лидерские качества.
C2	<ul style="list-style-type: none"> • наличие практического опыта управления воздушными судами; • базовый уровень теоретической подготовки пилота.
C3	<ul style="list-style-type: none"> • способность к эффективной коммуникативной деятельности в профессиональном коллективе;

	<ul style="list-style-type: none"> • умение выстраивать и поддерживать конструктивные межличностные отношения.
C4	<ul style="list-style-type: none"> • компетентность в выполнении должностных обязанностей с высокой скоростью и качеством.
C5	<ul style="list-style-type: none"> • когнитивная способность к целенаправленному усвоению профессиональных знаний, навыков и умений.
C6	<ul style="list-style-type: none"> • высокий уровень успеваемости по профильным дисциплинам (точные науки); • наличие практического опыта пилотирования воздушных судов соответствующего класса.
C7	<ul style="list-style-type: none"> • владение основами иностранных языков; • наличие действующих сертификатов, подтверждающих уровень владения иностранными языками.
<p>Источник. Ротштейн А.П. (2019). Нечеткие когнитивные карты в анализе надежности систем. Надежность, Том 19, №4. doi.org/10.21683/1729-2646-2019-19-4-24-3 [9]</p>	

Соответствующая матрица весовых коэффициентов W , характеризующая силы взаимодействия между концептами в модели, имеет следующий вид:

$$W_0 = \begin{matrix} & \begin{matrix} C_1 & C_2 & C_3 & C_4 & C_5 & C_6 & C_7 \end{matrix} \\ \begin{matrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \\ C_4 \\ C_5 \\ C_6 \\ C_7 \end{matrix} & \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0.4 & 0.5 & 0 & 0 & 0 \\ 0.6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.45 & 0 & 0.75 \\ 0 & 0 & 0.45 & 0 & 0.5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0.5 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.55 & 0 & 0 \\ 0 & -0.5 & 0 & -0.25 & 0 & 0.75 & 0 \end{vmatrix} \end{matrix} \quad (11)$$

Для проведения экспертной оценки переменных, соответствующих концептам, приведённым в таблице 2, применяются шкалы оценивания, представленные в таблицах 5 и 6. Указанные шкалы обеспечивают количественную интерпретацию качественных характеристик факторов, позволяя учитывать субъективные экспертные суждения в рамках формализации нечеткой когнитивной модели.

Весовые коэффициенты в матрице W были определены на основе экспертных оценок пяти специалистов с опытом работы в области безопасности полетов от 10 до 20 лет. Эксперты оценивали влияние каждого концепта на другие по шкале от 0 до 1; окончательные значения получены усреднением оценок. В случае значительных расхождений мнений проводилась дополнительная консультация для достижения согласованной оценки. Персональные данные экспертов не раскрываются и используются исключительно для целей исследования.

Следует отметить, что применение рекуррентного соотношения (7) может приводить к выходу накопленных значений концептов в стационарном режиме за пределы

установленных интервалов допустимых значений. Однако подобное отклонение не оказывает существенного влияния на качественную интерпретацию результатов моделирования, в связи с чем нормировочные процедуры в рамках настоящего исследования не применяются [13].

Таблица 5. Шкала экспертной оценки уровня развития концептов [9]

Лингвистическая характеристика уровня развития	Соответствующее числовое значение
Высокий уровень развития концепта	50
Уровень выше среднего	37,5
Средний уровень	25
Уровень ниже среднего	12,5
Низкий уровень развития концепта	0

Балюбаш В.А. и др. (2013). Разработка и реализация модели на основе экспертных оценок / В.А. Балюбаш, Ю.Г. Стегаличев, С.Е. Алёшичев, М.Б. Абугов: Учеб.-метод. пособие. СПб.: НИУ ИТМО; ИХиБТ, 58 с. [10]

Таблица 6. Шкала экспертной оценки силы влияния концептов [10]

Лингвистическая характеристика влияния	Соответствующее числовое значение
Максимальное положительное влияние	25
Повышенное положительное влияние	12,5
Нейтральное (стабильное) влияние	0
Сниженное отрицательное влияние	-12,5
Максимальное отрицательное влияние	-25

Балюбаш В.А. и др. (2013). Разработка и реализация модели на основе экспертных оценок / В.А. Балюбаш, Ю.Г. Стегаличев, С.Е. Алёшичев, М.Б. Абугов: Учеб.-метод. пособие. СПб.: НИУ ИТМО; ИХиБТ, 58 с. [10]

Матрица (11), совместно с рекуррентным соотношением, обеспечивает возможность анализа пошаговой динамики изменения значений концептов, представленных в таблице 1, при заданном исходном векторе (4).

В частности, при исходном состоянии НКК

$$X_0 = [40 \ 25 \ 20 \ 15 \ 10 \ 5 \ 0] \quad (12)$$

получено стационарное состояние системы, которое определяется вектором

$$X_t = [52 \ 20 \ 55 \ 43 \ 63 \ 12 \ 10] \quad (13)$$

Таким образом, нечеткие когнитивные карты (НКК) могут рассматриваться как функциональный аналог дифференциальных уравнений, традиционно используемых при моделировании процессов динамического формирования профессиональных компетенций, умений и навыков. Существенным преимуществом применения НКК по сравнению с дифференциальными моделями является возможность непосредственного

включения экспертной информации для комплексного учета взаимодействующих факторов, влияющих на динамику профессиональной подготовки пилотов гражданской авиации.

Заключение

В рамках проведенного исследования предложен и реализован метод математического моделирования процесса подготовки авиационного персонала с использованием аппарата нечетких когнитивных карт (НКК). Разработанная модель позволяет учитывать комплекс разноуровневых факторов, определяющих уровень профессиональной подготовки пилотов гражданской авиации, включая как объективные, так и субъективные параметры, формализуемые на основе экспертных оценок [14].

Применение НКК обеспечивает возможность формализации сложных взаимосвязей между параметрами профессиональной надежности авиационного персонала в условиях ограниченности статистических данных и высокой степени неопределенности. В отличие от классических моделей динамики, разработанный подход позволяет оперативно интегрировать экспертные знания, учитывать нелинейные и взаимозависимые влияния факторов, что существенно повышает достоверность прогнозных оценок уровня профессиональной готовности летного состава [15].

Полученные результаты иллюстрационно демонстрируют эффективность использования нечетких когнитивных карт при анализе и прогнозировании процессов формирования профессиональных компетенций пилотов гражданской авиации. Разработанная методика может быть применена в практике образовательных учреждений, центров подготовки авиационного персонала, а также при проведении периодических аттестаций и формировании программ повышения квалификации специалистов.

Дальнейшие исследования предполагают расширение перечня факторов модели, совершенствование методов экспертной оценки весов влияния концептов, а также адаптацию предложенной модели для оценки подготовки специалистов в других отраслях транспортной безопасности.

Вклад авторов:

Долженко Н.А. – внесла существенный вклад в разработку концепции и дизайна исследования, участвовала в анализе и интерпретации полученных результатов, осуществляла критический пересмотр содержания статьи. Утвердила окончательный вариант статьи для публикации и согласилась нести ответственность за достоверность данных и целостность исследования.

Гармаш О.В. – осуществляла сбор и анализ исходных данных, принимала участие в разработке математической модели подготовки авиационного персонала, подготовке и написании текста статьи. Утвердила окончательный вариант статьи для публикации и согласилась нести ответственность за все аспекты работы, связанные с достоверностью результатов и научной корректностью исследования.

Список литературы

1. The development of a mathematical model of professional training of aviation personnel

- participated in ensuring flight safety. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2023. - №4(4(124)). – P.88–94. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.286244>
2. The development of a method for assessing the preparation of aviation personnel participated in ensuring flight safety. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2023. - №5(3(125)). - №57–63. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.289933>
 3. Департамент управления безопасностью полетов, качества, стратегии и соответствия стандартам АО «Авиационная администрация Казахстана». Анализ состояния безопасности полетов воздушных судов гражданской авиации республики Казахстан за 2023 год. 24с.
 4. Рыков Ю.Г. Технология использования нечетких когнитивных карт с математической точки зрения // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2021. № 73. 22 с.
 5. Кубланов М.С. Математическое моделирование задач летной эксплуатации воздушных судов на взлете и посадке: монография / М.С. Кубланов. - Москва: РИО МГТУ ГА, 2013. - 270 с
 6. Задорожный В.Д. Методика летного обучения: методические указания. – Ульяновск: УВАУ ГА (И). 22с.
 7. F. Wilfrid Lancaster. Indexing and abstracting in theory and practice. University of Illinois, Graduate School of Library and Information Science. P.412
 8. Заграновская А. В. Системный анализ на основе нечетких когнитивных карт. Вестник РЭУ им. Г. В. Плеханова, № 4 (100). DOI: <http://dx.doi.org/10.21686/2413-2829-2018-4-152-160>
 9. Марданов М.Дж., Рзаев Р.Р. Нечеткая логика Л.А. Заде как ключ к описанию гуманистических систем. DOI: 10.25045/jpis.v12.i2.02
 10. Ротштейн А. П. Анализ риска: нечеткая когнитивная карта как альтернатива дереву отказов. Известия РАН. Теория и системы управления, 2019, № 2, С. 47-57. DOI: 10.1134/S0002338819020161
 11. Ротштейн А.П. Нечеткие когнитивные карты в анализе надежности систем. Надежность, Том 19, №4. doi.org/10.21683/1729-2646-2019-19-4-24-3
 12. Балюбаш В.А. и др. Разработка и реализация модели на основе экспертных оценок / В.А. Балюбаш, Ю.Г. Стегаличев, С.Е. Алёшичев, М.Б. Абугов: Учеб.-метод. пособие. СПб.: НИУ ИТМО; ИХиБТ, 58 с.
 13. Долженко Н. Математическое моделирование и методы системного анализа в управлении безопасности полетов в гражданской авиации. Вестник Национальной инженерной академии Республики Казахстан. – №4(74). – Алматы, 2019. – С. 23–28.
 14. [Dolzhenko N., Assilbekova I., Abzhapbarova A., Mussayeva G., Sarzhanov T.](#) Unification of Training Programs for Aviation Professionals as a Flight Safety Criterion. Journal of Aerospace Technology and Management. - 2024. – Vol. 16/ - Article number e0124. DOI: [10.1590/jatm.v16.1320](https://doi.org/10.1590/jatm.v16.1320)
 15. [Dolzhenko N., Assilbekova I., Konakbay Z., Garmash O., Muratbekova G.](#) Organization of Transport Services and Transport Process Safety. Periodica Polytechnica Transportation Engineering. -2025. - № 53(3). - P. 277–291. DOI: [10.3311/PPtr.38137](https://doi.org/10.3311/PPtr.38137)

Н.А. Долженко*, О.В. Гармаш

«Азаматтық авиация академиясы, Алматы, Қазақстан Республикасы

Ұшу қауіпсіздігін қамтамасыз ету саласында авиациялық персоналды даярлауды математикалық модельдеу

Аңдатпа. Азаматтық авиацияның қазіргі заманғы дамуы ұйымдастыру-техникалық жүйелердің күрделенуімен, ұшу қауіпсіздігін қамтамасыз ету талаптарының күшейтілуімен қатар жүреді. Зерттеудің өзектілігі қауіпсіздік талаптарын ескере отырып, кәсіптік даярлау процестерін оңтайландыруға мүмкіндік беретін математикалық модельдеу әдістерін қолдану есебінен авиаперсоналды даярлаудың білім беру бағдарламаларының тиімділігін арттыру қажеттілігіне негізделген. Зерттеу мәні ұшу қауіпсіздігін қамтамасыз ету тұрғысынан авиаперсоналды дайындау процестері болып табылады. Зерттеу міндеттері даярлықты ұйымдастырудың қолданыстағы тәсілдерін талдауды, кәсіби құзыреттерді, қауіпсіздік параметрлерін, сондай-ақ оқу процесіне әсер ететін сыртқы және ішкі факторларды ескеретін математикалық модельді әзірлеуді қамтиды. Жұмыстың мақсаты авиаперсоналды дайындау процесін бағалауға және оңтайландыруға мүмкіндік беретін математикалық модельді құру және сынақтан өткізу болып табылады. Зерттеуде жүйелі талдау, басқару теориясы, математикалық модельдеу және имитациялық модельдеу әдістері пайдаланылды. Модельдің жұмысын көрсету үшін сандық мысал келтірілген; оның нәтижелері дайындық тиімділігіне барынша әсер ететін негізгі параметрлерді айқындауға мүмкіндік беретін эмпирикалық деректер негізінде иллюстрациялық сипатта болады. Жұмыс нәтижелері персоналдың кәсіби дайындық деңгейіне әртүрлі факторлардың әсерін сандық бағалау мүмкіндігін көрсетеді. Алынған қорытындылар ұшу қауіпсіздігіне жауапты білім беру бағдарламаларын түзету бойынша ұсынымдарды қалыптастыруға мүмкіндік береді.

Түйін сөздер: авиациялық персонал; ұшу қауіпсіздігі; кәсіби дайындық; математикалық модельдеу; анық емес танымдық карталар.

N. Dolzhenko*, O.Garmash

"Civil Aviation Academy", Almaty, Republic of Kazakhstan

Mathematical modeling of aviation personnel training in the field of flight safety

Abstract. The modern development of civil aviation is accompanied by the complication of organizational and technical systems, the tightening of flight safety requirements. The relevance of the study is due to the need to increase the effectiveness of educational programs for training aircraft personnel through the use of mathematical modeling methods that allow optimizing professional training processes taking into account safety requirements. The subject of the study is the processes of training aircraft personnel in the context of ensuring flight safety. The objectives of the study include the analysis of existing approaches to the organization of training, the development of a mathematical model that takes into account professional competencies, safety

parameters, as well as external and internal factors that affect the educational process. The purpose of the work is to build and test a mathematical model that allows you to evaluate and optimize the process of training aircraft personnel. The study used methods of system analysis, control theory, mathematical modeling and simulation modeling. To demonstrate the operation of the model, a numerical example is given; its results are illustrative based on empirical evidence to identify the key parameters that have the greatest impact on the effectiveness of training. The results of the work demonstrate the possibility of quantifying the impact of various factors on the level of professional readiness of personnel. The findings make it possible to formulate recommendations for adjusting educational programs responsible for flight safety.

Keywords: aviation personnel; flight safety; professional training; mathematical modeling; fuzzy cognitive maps.

References

1. The development of a mathematical model of professional training of aviation personnel participated in ensuring flight safety. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2023. - №4(4(124)). – R.88–94. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.286244>
2. The development of a method for assessing the preparation of aviation personnel participated in ensuring flight safety. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2023. - №5(3(125)). - №57–63. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.289933>
3. Departament upravleniya bezopasnostyu poletov, kachestva, strategii i sootvetstviya standartam AO «Aviatsionnaya administratsiya Kazakhstana». Analiz sostoyaniya bezopasnosti poletov vozdushnikh sudov grazhdanskoi aviatsii respubliki Kazakhstan za 2023 god. 24s.
4. Rikov Yu.G. Tekhnologiya ispolzovaniya nechetkikh kognitivnikh kart s matematicheskoi tochki zreniya // Preprinti IPM im. M.V. Keldisha. 2021. № 73. 22 s.
5. Kublanov M.S. Matematicheskoe modelirovanie zadach letnoi ekspluatatsii vozdushnikh sudov na vzlete i posadke: monografiya / M.S. Kublanov. - Moskva: RIO MGTU GA, 2013. - 270 s
6. Zadorozhnii V.D. Metodika letnogo obucheniya: metodicheskie ukazaniya. – Ulyanovsk: UVAU GA (I). 22s.
7. F. Wilfrid Lancaster. Indexing and abstracting in theory and practice. University of Illinois, Graduate School of Library and Information Science. P.412
8. Zagranovskaya A. V. Sistemniy analiz na osnove nechetkikh kognitivnikh kart. Vestnik REU im. G. V. Plekhanova, № 4 (100). DOI: <http://dx.doi.org/10.21686/2413-2829-2018-4-152-160>
9. Mardanov M.Dzh., Rzaev R.R. Nechetkaya logika L.A. Zade kak klyuch k opisaniyu gumanisticheskikh sistem. DOI: 10.25045/jpis.v12.i2.02
10. Rotshtein A. P. Analiz riska: nechetkaya kognitivnaya karta kak alternativa derevu otkazov. Izvestiya RAN. Teoriya i sistemi upravleniya, 2019, № 2, S. 47-57. DOI: 10.1134/S0002338819020161
11. Rotshtein A.P. Nechetkie kognitivnie karti v analize nadezhnosti sistem. Nadezhnost, Tom 19, №4. doi.org/10.21683/1729 2646 2019 19 4 24 3

12. Balyubash V.A. i dr. Razrabotka i realizatsiya modeli na osnove ekspertnikh otsenok / V.A. Balyubash, Yu.G. Stegalichev, S.E. Alèshichev, M.B. Abugov: Ucheb.-metod. posobie. SPb.: NIU ITMO; IKhiBT, 58 s.
13. Dolzhenko N. Matematicheskoe modelirovanie i metodi sistemnogo analiza v upravlenii bezopasnosti poletov v grazhdanskoj aviatsii. Vestnik Natsionalnoi inzhenernoi akademii Respubliki Kazakhstan. – №4(74). – Almati, 2019. – S. 23–28.
14. Dolzhenko N., Assilbekova I., Abzhapbarova A., Mussayeva G., Sarzhanov T. Unification of Training Programs for Aviation Professionals as a Flight Safety Criterion. Journal of Aerospace Technology and Management. - 2024. – Vol. 16/ - Article number e0124. DOI: 10.1590/jatm.v16.1320
15. Dolzhenko N., Assilbekova I., Konakbay Z., Garmash O., Muratbekova G. Organization of Transport Services and Transport Process Safety. Periodica Polytechnica Transportation Engineering. -2025. - № 53(3). - R. 277–291. DOI:10.3311/PPtr.38137

Сведения об авторах:

Долженко Н.А. - кандидат политических наук, доцент кафедры летной эксплуатации
Гармаш О.В. – кандидат технических наук, ассоц. профессор Академии гражданской авиации Республики Казахстан,

Долженко Н.А. - саяси ғылымдарының кандидаты; Қазақстан Республикасы Азаматтық авиация академиясы Әуе кемелерінің ұшуын пайдалану кафедрасының доценті
Гармаш О.В. - т. ғ. к., аға қауымдастырылған профессор, Азаматтық авиация академиясы, Алматы, Қазақстан Республикасы

Dolzhenko N. - Candidate of Political Sciences; Associate Professor of the Department of Aircraft Flight Operation of the Civil Aviation Academy of the Republic of Kazakhstan
Garmash O. - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor AGA, Academy of Civil Aviation, Almaty, Republic of Kazakhstan



Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).



ХҒТАР 55.43.31
Ғылыми мақала

<https://doi.org/10.32523/2616-7263-2026-154-1-132-148>

Тиімді әдістерді таңдау арқылы TORO-40D шахта өзітөкіштерінің жұмыс қабілеттілігін арттыру

М.Ә. Жуманов¹ , Қ.Д. Байжуманов¹ , Н.С. Камзанов^{2*} ,
Е.Б. Калиев³ , Р.А. Козбагаров³ 

¹Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан

²Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті,
Алматы, Қазақстан

³М.Тынышбаев атындағы АЛТ университеті, Алматы, Қазақстан

E mail: ¹mergenamir@mail.ru, ¹kadirbek_79@mail.ru,

^{2*}n.kamzanov@satbayev.university, ³Kaliyev.ye@mail.ru, ³ryctem_1968@mail.ru

Андатпа. «Қазақмыс» корпорациясының жерасты кеніштерінде соңғы жылдары айтарлықтай тоқтап қалулар жиі байқалады. Бұл кеніштерде әртүрлі пневматикалық доңғалақ жетектері бар жоғары өнімді өздігінен жүретін жабдықтардың көптеген түрлері пайдаланылады. Тәжірибе көрсеткендей, жерасты өздігінен жүретін қондырғыларды жөндеудің ескірген әдістері мен құралдарын пайдалану қазіргі өндірістік талаптарға толық сәйкес келмейді және тиімсіз болып отыр. Мұндай бақылау жүйесінің болмауы жабдықтардың күтпеген жерден істен шығуына, өндірістік процестің баяулауына және жөндеу шығындарының артуына әкеледі. Істен шығудың алдын алу үшін белгілі бір жұмыс уақыты өткеннен кейін диагностикалық мәліметтер негізінде әрбір қондырғының болжамды және қалған қызмет ету мерзімін анықтау қажет. Бұл тәсіл техникалық қызмет көрсетуді алдын ала жоспарлауға, апаттық жағдайлардың алдын алуға және жабдықтардың жалпы пайдалану тиімділігін арттыруға мүмкіндік береді. Осы мақалада «Қазақмыс» корпорациясының кеніштерінде қолданылатын машиналар бөлшектерінің қалған қызмет ету мерзімін болжауға бағытталған жүргізілген зерттеулердің негізгі нәтижелері қарастырылып, алынған деректердің өндірістік тәжірибеде қолдану мүмкіндіктері талданады.

Түйін сөздер: диагностика, өзітөкіш, доңғалақ редукторы, спектрлік талдау, агрегаттық жөндеу әдісі, ресурс

Кіріспе

Қазіргі уақытта кен өндіру жүргізіліп жатқан «Қазақмыс» корпорациясының № 55, 57, 65, 67 ірі шахталары жаңа үлгідегі кеніштер болып табылады. Бұл шахталардың қазбаларында пневматикалық доңғалақты және шынжыр табанды әртүрлі жетекті, жоғары өнімді, өздігінен жүретін жабдықтардың әр түрлері пайдаланылады. Машиналардың көпшілігінде дизельді жетек және топсалы-буынды рама бар [1-3].

Тәжірибе көрсеткендей, жерасты өздігінен жүретін жабдықтарды пайдалану кезінде ескі әдістер мен құралдарды қолданатын жөндеу жүйесін пайдалану тиімсіз болып шықты. «Қазақмыс» корпорациясының жерасты кеніштерінде технологиялық жабдықтардың едәуір тоқтап тұруы байқалады. Тоқтап тұру ұзақтығы жалпы уақыттың 12%-дан 30%-на дейін ауытқиды. Машиналардың жалпы паркінің (20...30)%-ы үнемі жөндеуде тұрады, қосалқы бөлшектердің жылдық шығыны (15...20)%-ды, ал материалдар – машиналар мен жабдықтардың жалпы құнының (8...10)%-ын құрайды. Жөндеушілердің саны жерасты жұмысшыларының жалпы санының (20...25)%-ын құрайды.

Өздігінен жүретін машиналарды пайдаланудың төмен тиімділігінің негізгі себептерінің бірі – диагностика әдістері мен құралдарын қолдану арқылы әрбір машинаның және оның агрегаттарының техникалық жай-күйін тұрақты бақылау жүйесінің болмауы.



1-сурет. TORO-40D өзітөкіш

Машинаның (агрегаттың) істен шығуына дейінгі жұмыс істеген ресурсының мәні белгілі бір шектерде ауытқитындығына байланысты, осы кезеңде істен шығу ықтималдығы пайда болады. Істен шығуды болдырмау үшін машинаның (агрегаттың) белгілі бір жұмыс істеу уақытында диагностика деректері бойынша болжамды және қалдық ресурсты анықтау қажет. Бұл деректер бойынша агрегаттарды алып тастау немесе машинаны жөндеуге тоқтату мерзімдері белгіленеді. Бұл апаттық жөндеулерді болдырмайды және агрегаттардың жұмысының сенімділігін арттырады. Осылайша, диагностика әдістері мен құралдарын қолдану арқылы машинаның әрбір агрегатының жұмысының сенімділігін арттыра отырып, тұтастай алғанда машинаның жұмысқа

қабілеттілігі артады. Осыған байланысты, заманауи ресурстық диагностикалау әдістері мен құралдарын қолдану арқылы оның агрегаттарының сенімді жұмысын арттыру жолымен машинаның жұмыс қабілеттілігін арттыруға бағытталған зерттеулер өзекті болып табылады.

Жұмыста зерттеу объектісі ретінде планетарлық доңғалақ редукторлары таңдалды. Бұл әр машинада олардың төртеуден болуымен, ал Жезқазған шахталарында 68 TORO-40D өзітөккіш (1-сурет) және 20 TORO-501 тиеу-тасымалдау машинасы жұмыс істейтіндігімен түсіндіріледі. Сонымен қатар, бұл редукторлардың бөлшектері мен құрастыру бірліктері кенеттен өзгертін динамикалық жүктемелерде жұмыс істейді және жиі шамадан тыс жүктеледі. Олардың салыстырмалы түрде төмен төзімділігі бар, бұл ресурстық параметрлерді, жөндеу әсерлерінің еңбек сыйымдылығы мен құнын есептеу үшін статистикалық материалды тез жинауға мүмкіндік береді, бұл жөндеу нормативтерін және доңғалақ редукторларын жөндеудің жедел кестелерін әзірлеу үшін қажет [1-4].

Әдіснама

Машиналар мен жабдықтарды диагностикалау әдістері мен құралдарының көмегімен жұмысқа қабілетті жағдайда ұстау саласындағы зерттеулер авиацияда, теміржол және автомобиль көлігінде, машина жасау зауыттарында жүргізіледі.

Мұндай зерттеулер тау-кен машиналары мен жабдықтары үшін жүргізілмеген. Аталған салалардағы әзірлемелерді тау-кен өнеркәсібіне көшіру пайдаланудың ерекше шарттарына және осы машиналардың конструкциясының айрықша ерекшеліктеріне байланысты мүмкін емес.

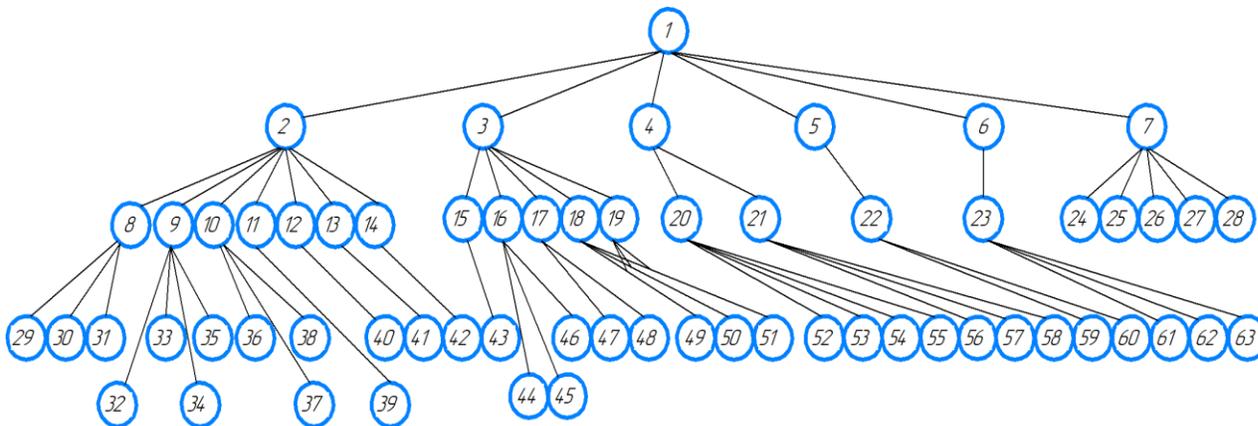
Жұмыста алынбалы агрегаттарды диагностикалау әдістері мен құралдарын және айналым қорының қорларын басқару теориясын қолдану арқылы пневматикалық доңғалақты өздігінен жүретін дизельді машиналардың жұмыс қабілеттілігін арттыру бойынша зерттеулердің нәтижелері баяндалған. Зерттеу объектісі ретінде TORO-40D өзітөккіштердің доңғалақ редукторлары алынды, олар жалпы май ваннасы бар агрегаттардың типтік өкілдері ретінде және өзітөккіштер мен тиегіштерде олардың едәуір (240-тан астам) санына байланысты таңдалды. Отандық және шетелдік тәжірибе машиналар мен жабдықтарды диагностикалау процестерін енгізу олардың жұмыс қабілеттілігін арттырудың маңызды құралдарының бірі болып табылатынын көрсетеді. Істен шығулардың уақтылы алдын алу олардың санын азайтуға және, соның салдарынан, машиналардың тоқтап тұруын қысқартуға әкеледі, олардың жөндеу аралық ресурсы толығырақ пайдаланылады [2,4,5].

Техникалық диагностика реттеу, баптау, жөндеу және басқа да профилактикалық жұмыстарды уақтылы орындау есебінен машиналарды пайдаланудың өнімділігі мен үнемділігін арттыруға мүмкіндік береді.

Күрделі жүйелердің дайындығы тек істен шығу қарқындылығының өсуімен ғана емес, сонымен қатар техникалық құрылғыларды және атап айтқанда, машиналарды қалпына келтіру ұзақтығының артуымен де нашарлайтыны белгілі. Осыған байланысты, қалпына келтіру сипаттамаларын жақсарту нәтижесінде машиналардың жұмыс қабілеттілігін арттыру міндеті үлкен өзектілікке ие болады: істен шыққан элементті іздеу уақыты және

істен шығуды жою уақыты.

Белгілі болғандай, қазіргі заманғы жөндеу жүйелері агрегаттық жөндеу әдісіне (АЖӘ) негізделген. Негізгі технологиялық жабдықты АЖӘ-ге көшірудің негізгі шарты – машиналарды өзара алмастырылатын алынбалы агрегаттарға, құрастыру бірліктеріне іс жүзінде бөлшектеу. Машиналарды бөлшектеу пайдалану жағдайында машиналардың жұмыс қабілеттілігін қалпына келтірудің ең үнемді жолын қамтамасыз ететін алынбалы элементтердің осындай номенклатурасын әзірлеуді мақсат етеді. Демек, әрбір машина үшін алынбалы агрегаттардың оңтайлы номенклатурасы тұжырымдалуы тиіс (2-сурет).



2-сурет. TORO-40D құрылымдық-функционалдық сұлбасы

1 – автокөлік; 2 – қозғалтқыш; 3 – трансмиссия; 4 – жүргізу механизмі; 5 – рама; 6 – кузовты басқару механизмі; 7 – электр жабдықтары; 8 – майлау жүйесі; 9 – қоректендіру жүйесі; 10 – салқындату жүйесі; 11 – каталикалық нейтрализатор; 12 – поршеньдік-цилиндрлік топ; 13 – иінді-шатунды механизм; 14 – газ тарату механизмі; 15 – беріліс қорабы; 16 – гидротрансформатор; 17 – кардандық беріліс; 18 – алдыңғы ось; 19 – артқы ось; 20 – рульдік басқару; 21 – тежегіш жүйесі; 22 – жартылай рама топсасы; 23 – рульдік басқарудың гидрожүйесі; 24 – генератор; 25 – стартер; 26 – аккумуляторлық батарея; 27 – кернеу реттегіші; 28 – фаралар; 29 – сүзгі элементтері; 30 – гидронасос; 31 – майлы радиатор; 32 – жоғары қысымды отын насосы; 33 – отынды алдын ала қыздырғыш; 34 – отын сүзгілерінің элементтері; 35 – ауа тазартқыш; 36 – су насосы; 37 – радиатор; 38 – термостат; 39 – түгін газдарын каталикалық тазартқыш; 40 – блок-цилиндр; 41 – иінді білік (жинағымен); 42 – бөліп-тарату білігі (жинағымен); 43 – фрикциондар; 44 – сорғы тегершігі; 45 – турбиналық дөңгелек; 46 – реактор; 47 – аралық кардандық беріліс; 48 – жетекші доңғалақтардың кардандық берілісі; 49 – дифференциал; 50 – конустық цилиндрлік беріліс; 51 – ступица; 52 – бұрылыс цилиндрлері; 53 – бұру тізбегі; 54 – клапандық таратушы; 55 – рульдік басқару блогы («орбитрол»); 56 – гидроаккумуляторлар; 57 – тежегіш крандары; 58 – тұрақ тежегішінің цилиндрлері; 59 – артқы жартылай ось; 60 – гидронасос; 61 – көтеру цилиндрлері; 62 – корпус көтергіш цилиндр; 63 – корпусның гидравликалық жүйесінің негізгі дистрибьюторы

АЖӘ-нің негізгі артықшылығы – машинадағы алынбалы агрегаттардың жөнделмейтіндігінде. Ақаулылардың орнына машинаға айналым қорынан агрегаттар орнатылады. Демек, жекелеген агрегаттарды дайындау және жөндеу сапасын арттыру есебінен машинаның жұмыс қабілеттілігін арттыруға болады.

Жалпы май ваннасында жұмыс істейтін әрбір бөлшектің құрылымдық параметрлері таңдалды, олардың шекті мәндеріне жеткенде редуктор күрделі жөндеуге ағытылады және оңтайлы диагностикалау әдісі қолданылады.

Маймен жұмыс істейтін бөлшектер мен құрастыру бірліктерінің көпшілігін диагностикалаудың басым әдісі майды спектрлік талдау болып табылады.

АЖӘ кезінде тозу дәрежесі тек сол бөлшек пен шекті тозуы кезінде агрегат жөндеуге алынып тасталатын құрастыру бірліктерінің түйісетін бөлшектері үшін ғана анықталады. Эксперименттік зерттеулер кезінде бір май ваннасында жұмыс істейтін доңғалақ редукторының әрбір бөлшегінің химиялық құрамы мұқият зерттелді (1-кестені қараңыз).

Майды спектрлік талдауды пайдалану кезінде май сынамаларын алу өте жауапты операция болып табылады. Талдауға арналған эталондар TORO-40D өзінтөккіштердің агрегаттарында (гидромеханикалық беріліс қорабы, көпірлер, доңғалақ редукторлары және т.б.) қолданылатын жаңа мотор майы негізінде дайындалды [5-7].

1-кесте. TORO-40D өзінтөккіштердің доңғалақ беріліс бөліктерінің химиялық құрамы

№	Бөлшектердің атауы	Саны	Элементтердің орташа құрамы, %					
			C	Mn	Cr	Cu	Si	Ni
1	Күн тегершігі	1	0.5	0.6	0.2	0.3	0.3	0.3
2	Жетектегі тегершік	1	0.4	0.6	0.6	0.3	0.3	1.2
3	Сателлит	3	0.5	0.6	-	-	0.3	0.3
4	Сателлит бармағы	3	0.4	0.6	0.9	0.3	0.3	0.3
5	Жартылай өс	1	0.5	0.6	0.2	0.3	0.3	0.3
6	Шұлық	1	0.1	0.4	0.7	2.9	-	-
7	Жетектегіш	1	0.3	0.6	0.2	0.3	0.3	-
8	Жартылай өс сақинасы	1	0.4	0.6	0.5	0.3	0.3	0.3

Май сынамалары редуктор үшін маңызды кезеңдерде алынды: іске қосылғаннан кейін, май қосқаннан кейін, май ауыстырғаннан кейін, жалпы ваннада жұмыс істейтін бөлшектердің техникалық ресурсының ең төменгі мәндерінде редукторды алып тастау алдында. Май сынамаларының талдауы МФС-7 қондырғысымен және айнымалы ток доғасының генераторы, штатив, полухроматор және электронды-тіркеу қондырғылары,

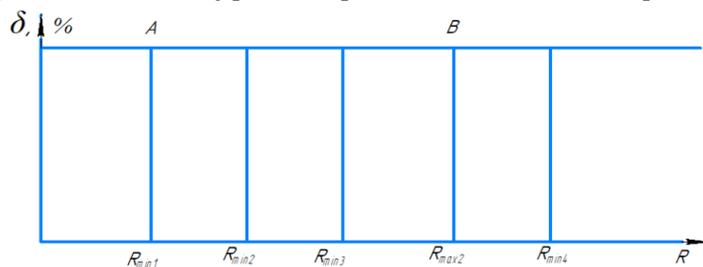
зертханалық микроаналитикалық үлгідегі таразылар және т.б. кешеніндегі сынамаларды дайындауға арналған қондырғылармен жабдықталған арнайы зертханада жүргізілді.

Нәтижелер мен талқылаулар

Майды спектрлік талдау бойынша диагностиканы енгізу тозатын беттердің бөлшектерін өлшеу, жиынтық жұмыс істеу уақытынан тозуды алу үшін өлшеу деректерін өңдеу $\delta = f(\sum R)$ және тозудың сызықтық шамасынан майдағы тозған материалдың массасын алу бойынша $m = F(\delta)$ үлкен дайындық жұмыстарын жүргізуді талап етті. Бұл тәуелділіктерді тезірек алу үшін ең аз санды өлшеулер жүргізу қажет болды, яғни, деректерді тек редуكتور күрделі жөндеуге алынып тасталатын бөлшектер үшін ғана алу керек болды.

Жұмыста ресурсты бөлудің ықтималдық теориясы қабылданды, онда әрбір жөндеу бірлігінің минималды (R_{\min}), орташа (\bar{R}) және максималды (R_{\max}) ресурс мәндері, оның таралу заңы мен параметрлері бар. Редуكتورдың күрделі жөндеуге алынуына себеп болатын бөлшектерге ресурсының мәні минималды болатын бөлшектер жатады $R_{\min} \leq R_{\max}$, мұнда R_{\max}^{\min} – максималды ресурстың минималды мәні. 3-суретте 1, 2, 3, 4-бөлшектер үшін $R_{\min i}$ және $R_{\max i}^{\min}$ орналасу графигі берілген [5-7].

А ($R_{\min 1}$)-дан В ($R_{\min 2}$)-ға дейінгі аралықта 1, 2, 3-бөлшектердің істен шығу және редуكتورдың жөндеуге алыну ықтималдығы бар. $R_{\min 2}$ жұмыс істеу уақытына жеткенде 2-бөлшектің істен шығу және редуكتورдың жөндеуге алыну ықтималдығы 100%-ға жетеді. $R_{\min 1} \leq R_{\max i}^{\min}$ болатын бөлшектер үшін аспаптық өлшеулер арқылы есептеу үшін $\delta \leq (\sum R)$ және $\delta = F(m)$ деректері алынады. 3-суретте бұл 1, 2, 3, 4-бөлшектерге қатысты.



3 – сурет. Ресурс параметрлерін алу үшін бөлшектерді таңдау

Ресурс мәндерін бөлудің ықтималдық теориясы кезінде тозудың шекті шамасы R -ден $R_{\max i}^{\min}$ -қа дейінгі шектерде әртүрлі жұмыс істеу уақытында орын алуы мүмкін. Бұл жағдайда редуكتورдың таңдалған бөлшектер тобы үшін легирлеуші қоспаларды анықтау қажет, олардың майдағы мазмұны бойынша әрбір бөлшектің тозу дәрежесі туралы қорытынды жасалады.

Ең көп еңбекті қажет ететін міндет – редуكتور картеріндегі легирлеуші қоспалардың

массасын тозу дәрежесіне байланысты бөлшектер арасында бөлу. Бұл жағдайда әрбір бөлшек үшін айырым белгілерін табу қажет, олар бойынша майдағы белгілі бір компоненттердің оған тиесілі екендігі анықталады. 2-кестеде редуктордың жөндеуге алынуына себеп болатын төрт бөлшектің химиялық құрамы келтірілген.

2 - кесте. TORO-40D автоөзітөккіштің доңғалақ беріліс бөліктерінің орташа химиялық құрамы

№	Бөлшектердің атауы	Саны	Элементтердің орташа құрамы, %					
			C	Mn	Cr	Cu	Si	Ni
1	Күн тегершігі	1	0.5	0.6	0.2	0.3	0.3	0.3
2	Жетектегі тегрешік	1	0.4	0.6	0.6	0.3	0.3	1.2
3	Сателлит	3	0.5	0.6	-	-	0.3	0.3
4	Сателлит бармағы	3	0.4	0.6	0.9	0.3	0.3	0.3

Кесте негізінде әрбір қоспаның мөлшері басқа қоспалардың мөлшерімен байланысты деп айтуға болады. Осы байланысты пайдалана отырып, теңдеулер жүйесі құрастырылады. Негізгі легирлеуші материал ретінде Mn алынды, себебі ол бөлшектердің материалдарында үлкен мәнде және тең мөлшерде кездеседі. Есептеуді жеңілдету үшін теңдеулерді төрт компонент (Mn, Cr, Ni, Cu) бойынша құрастырамыз және олардың массасын Mn эквивалентіне теңестіреміз:

$$\sum Mn_j = Mn_1 + Mn_2 + Mn_3 + Mn_4, \quad (1)$$

мұндағы Mn_j , Mn_1 , Mn_2 , Mn_3 , Mn_4 , 1, 2, 3, 4 бөлшектерінің тозуынан пайда болған майдағы марганецтің мөлшері, г.

$$\sum Mi_j = Ni_1 + Ni_2 + Ni_3 + Ni_4, \quad (2)$$

мұндағы $\sum Mi_j$ – сынама алу сәтінде редутор картеріндегі никельдің жалпы массасы, г; Ni_1 , Ni_2 , Ni_3 , Ni_4 – 1, 2, 3, 4 бөлшектерінің тозуынан пайда болған майдағы никельдің мөлшері, г.

Mi -ді эквивалентті Mn_i -ге алмастырамыз. 2-кестеге сәйкес 1-бөлшекте Mn мөлшері Mi -ден 2 есе көп, 3 және 4-бөлшектерде Mn-ден 2 есе аз. Сонда (2) теңдеуі келесі түрге келеді:

$$\sum Ni = 0.5Mn_1 + 2Mn_2 + 0.5Mn_3 + 0.5Mn_4, \quad (3)$$

Осылайша $\sum Cr$ және $\sum Cu$ үшін теңдеулер құрастырамыз:

$$\sum Cr = 0.33Mn_1 + 2Mn_2 + 1.5Mn_4, \quad (4)$$

$$\sum Cu = 0.5Mn_1 + 0.5Mn_2 + 0.5Mn_4. \quad (5)$$

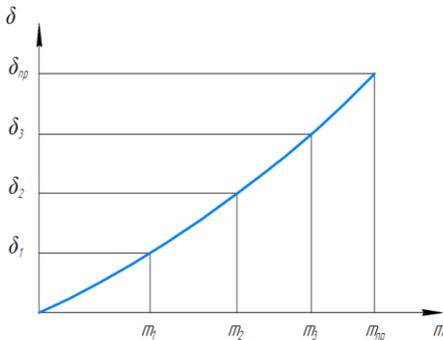
Спектрлiк талдау деректерi: $\sum Mn = 240г$; $\sum Ni = 140г$; $\sum Cr = 80г$; $\sum Cu = 80г$.

(3) формуласынан $Mn_1 = 2\sum Ni - 4Mn_2 - Mn_3 - Mn_4$ табамыз. (1) формуласы бойынша

$$Mn_2 = \frac{2\sum Ni - \sum Mn}{3} = 13г \quad \text{табамыз.}$$

Осылайша $\sum Mn_1 = 132г$; $\sum Mn_3 = 79г$; $\sum Mn_4 = 16г$ табамыз. Осы деректердi пайдалана отырып, $\delta = F(m)$ тәуелдiлiгi бойынша әрбiр кезектi диагностикадан кейiн әрбiр бөлшектiң тозу шамасы δ анықталады.

Барлық аспаптық өлшеулер тау-кен-шахта жабдықтары зауытында (ТКШЖЗ) редукторды жөндеуге бөлшектеу кезiнде және бөлшектердi ақауын анықтау кезеңiнде жүргiзiлдi. Тозатын беттердiң сызықтық өлшемдерiн өлшеу жұмыста әзiрлеген технологиялық карталарды пайдалану арқылы жүргiзiледi. Тозған материалдың массасын өлшеу негiзiнен зерттелетiн бөлшектi өлшеу арқылы жүргiзiледi.



4 - сурет. δ тозу мәнінің m тозған металл массасына тәуелдiлiгi

Бөлшектiң тозған материалының жиынтық массасы m_i келесi математикалық формула негiзiнде есептеледi: $m_i = m_n - m_b$, мұндағы көрсеткiштердiң мәні: m_n - бөлшектiң номиналды (бастапқы) массасы. Бұл көрсеткiш бұйымның техникалық паспортынан немесе зауыттық жұмыс сызбаларынан нақтыланады; m_b - пайдалану мерзiмiнен кейiнгi немесе сынақтан өткен бөлшектiң iс жүзiндегi (өлшенген) массасы.

Зерттеу барысында алынған барлық өлшеу деректерi мұқият статистикалық өңдеуден өткiзiледi. Тәжiрибелiк жұмыс нәтижесiнде таңдап алынған 8 бiрдей бөлшектiң әрқайсысы

үшін жеке көрсеткіштер анықталып, $\delta = F(R)$ түріндегі функционалдық тәуелділіктер құрастырылды (4-сурет).

Бұл графикалық деректер тозу шамасының жоғалтқан металл массасына тікелей қатыстылығын және бөлшектің пайдалану ресурсын нақты анықтауға мүмкіндік береді. 4-суретте көрсетілгендей, металл массасының кемуі мен механикалық тозудың арасындағы пропорционалды байланыс бөлшектердің беріктік сипаттамасын бағалаудың негізгі критерийі болып табылады.

Шекті тозу δ_{\max} дайындаушы зауыттың деректері бойынша алынды. δ_{\max} және диагностикалау арқылы алынған R жұмыс істеу уақытындағы тозу шамасы бойынша болжамды ресурс мына формула бойынша анықталды:

$$R_{\text{for}} = R \cdot \sqrt[n]{\frac{\delta_{\max}}{\delta}}, \text{ машина-сағат} \quad (6)$$

мұндағы R – өлшеу кезеңіндегі жұмыс істеу уақыты; n – тозу түріне байланысты болатын коэффициент, анықтамалықтарда келтіріледі.

Сателлиттер мысалында δ тәуелділігі легирлеуші қоспалардан $\delta = f(m_{Cr})$ және $\delta = f(m_{Cu})$ және т.б. алынды. Әрбір жұмыс істеу уақыты бойынша және белгілі тозу шамалары кезінде $\sum m_{Ni}$, $\sum m_{Cr}$, $\sum m_{Mn}$ және т.б. сомалары табылды.

$$\begin{aligned} \sum m_{Cr} &= m_{Cr_1} + m_{Cr_2} + \dots + m_{Cr_n}; \\ \sum m_{Ni} &= m_{Ni_1} + m_{Ni_2} + \dots + m_{Ni_n}; \\ &\dots\dots\dots \\ \sum m_{Mn} &= m_{Mn_1} + m_{Mn_2} + \dots + m_{Mn_n}, \end{aligned}$$

мұндағы $m_{Ni_1}, \dots, m_{Ni_n}, m_{Cr_1}, \dots, m_{Cr_n}, m_{Mn_1}, \dots, m_{Mn_n}$ – 1-ден n -ші бөлшекке дейінгі $\delta_1, \delta_2, \delta_n$ тозуы кезіндегі никель, хром, марганец және басқа легирлеуші қоспалардың массасы. Осылайша, әрбір жұмыс істеу уақыты үшін барлық 8 бөлшектің тозуынан майда әрбір компоненттің қанша болуы керектігі есептеледі. Осы деректер бойынша доңғалақ редукторының әрбір бөлшегі үшін ресурс мәндері, таралу заңдары және олардың параметрлері анықталады.

Картердің ағызылған және жұмыс істеп тұрған майларындағы легирлеуші қоспалардың жалпы массасын анықтау әдісі ұсынылды. Бұл масса редуктор бөлшектерінің тозған материалының массасына сәйкес келуі тиіс. Әдістің мәні келесідей:

1. Картердегі майдың ең төменгі деңгейіне жеткенде сынама алынады;
2. Сынама алғаннан кейін максималды белгіге дейін май құйылады;

3. Құйылатын майдың көлемі $V_y = V_{\max} - V_{\min}$, мұнда V_{\max} , V_{\min} – картердегі майдың максималды және минималды көлемдері.

4. Бөлшектердің тозуынан пайда болған және ағып кеткен маймен бірге редуктордан шығарылған компоненттердің жалпы массасы мына формула бойынша есептеледі:

$$\sum m_{Cr} = m_{Cr_1} + m_{Cr_2} + \dots + m_{Cr_n};$$

$$\sum m_{Mn} = m_{Mn_1} + m_{Mn_2} + \dots + m_{Mn_n} \text{ және т.б.}$$

мұндағы $m_{Cr_1}, m_{Cr_2}, \dots, m_{Cr_n}, m_{Mn_1}, m_{Mn_2}, \dots, m_{Mn_n}$ – сәйкесінше Cr, Mn және т.б. компоненттерінің массасы, ағып кеткен маймен картерден шығарылған және 1, 2 ... n рет май қосқаннан кейін алынған.

5. $\delta = f(m_i)$ тәуелділіктерін алу үшін ескерілуі қажет әрбір легирлеуші қоспаның жалпы массасы мына теңдеуден табылады:

$$\sum M_i = M_i^z + M_i^d + M_i^b,$$

мұндағы M_i^z, M_i^d – ауыстыру және ағып кету кезінде картерден шығарылған i - ші легирлеуші қоспаның жалпы массасы; M_i^b – картерде жұмыс істеп тұрған майдан соңғы сынама алу кезіндегі i -ші легирлеуші қоспаның массасы. Сонда $\delta = f(\sum M_{Cr})$.

Диагностикалау мерзімділігі (τ) диагностикалау мен жөндеуге кететін меншікті шығындар минималды болатындай етіп таңдалуы қажет. Диагностикалау мерзімділігі жалпы түрде мына формула бойынша анықталады:

$$\tau = \mu \cdot R, \text{ маш. сағат} \quad (7)$$

мұндағы μ – оңтайлылық коэффициенті, оңтайлы мерзімділіктің істен шығулар арасындағы орташа жұмыс істеу уақытынан қанша есе артық немесе кем екенін көрсетеді.

Істен шығуға дейінгі жұмыс істеу уақытының экспоненциалды таралу заңы кезінде оңтайлылық теңдеуі келесі түрге ие болады:

$$e^{-\lambda\tau} - \lambda\tau - 1 - \frac{C_d}{C_a} = 0, \quad (8)$$

мұндағы $\lambda = \frac{1}{R}$ – істен шығулар ағынының параметрі.
Вейбулл таралу заңы кезінде:

$$\frac{\alpha\beta \cdot \tau^{\beta-1}}{e^{-\alpha\tau^\beta}} \int e^{\alpha R^\beta} dR + \alpha\tau^\beta - \frac{C_{d.o.}}{C_A} = 0 \quad (9)$$

мұндағы α, β – таралу параметрлері.

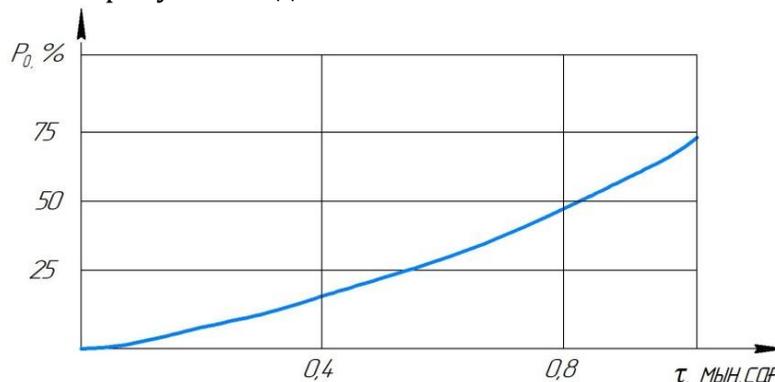
5-суретте техникалық нысанның нақты белгіленген жұмыс режимі мен қоршаған ортаның пайдалану жағдайларына сәйкес, диагностикалау шараларының өткізілу жиілігіне байланысты апаттық жөндеу ықтималдығының өзгеру динамикасы көрсетілген. Графиктік мәліметтер кезекті тексерулер арасындағы уақыт аралығының ұзаруы мен кенеттен орын алатын істен шығу жағдайларының арасындағы тікелей корреляцияны айқын бейнелейді.

Бұл тәуелділік келесі маңызды аспектілерді ашады:

Диагностикалау мерзімділігінің әсері: Тексерулер арасындағы интервалдың ұлғаюы жабдықтың жай-күйін бақылау деңгейін төмендетіп, апаттық жөндеу жұмыстарының туындау қаупін едәуір арттырады;

Пайдалану тиімділігі: Суреттегі қисықтар техникалық қызмет көрсетудің оңтайлы кестесін құру үшін негіз болып табылады, бұл өндірістік шығындарды азайтуға және техниканың сенімділігін жоғарылатуға мүмкіндік береді;

Ықтималдық болжамы: Алынған заңдылықтар арқылы нақты пайдалану жағдайларында жабдықтың істен шығу қаупін алдын ала болжап, профилактикалық шараларды уақтылы жоспарлауға болады.



5 - сурет. Жиі диагностикалау мен авариялық жөнделудің ықтималдылық тәуелділігі

Осылайша, 5-суретте бейнеленген жиі диагностикалау мен авариялық жөнделудің ықтималдылық тәуелділігі техникалық жүйелердің қауіпсіздік стратегиясын қалыптастыруда шешуші рөл атқарады.

Картерден май сынамалары келесі жағдайларда алынады: бұйымның іске қосылуы аяқталғаннан кейін, әрбір май қосу және ауыстырудан кейін, сондай-ақ май ваннасында жұмыс істейтін жекелеген бөлшектердің тозу дәрежесін анықтау үшін.

Майды іске қосу, қосу және ауыстыру мерзімділігі пайдалану жөніндегі нұсқаулықта көрсетілген. Сынама алудың мерзімділігі мен саны оңтайландырылады.

Техникалық сараптама жүргізу барысында, ең алдымен, болжамды қалдық ресурсы $R_{\text{при}}$

міндетті түрде есептелуі қажет редуктордың негізгі бөлшектері мен жеке құрастыру бірліктерінің тізімі айқындалады. Бұл кезеңде «сенімділіктің әлсіз буыны» принципі қолданылады: яғни, жалпы агрегаттың істен шығуына бірінші кезекте себеп болуы мүмкін, максималды ресурсы R_{\max}^{\min} ең аз мәнге ие болатын бөлшектер мен тораптар ерекше мұқияттылықпен таңдап алынады (6-суретті қараңыз).

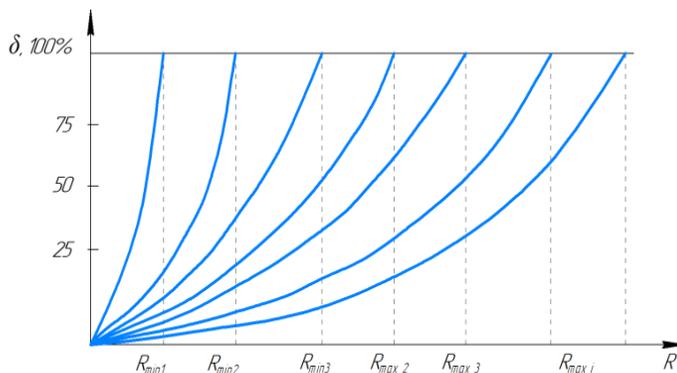
Бұл үдерістің маңыздылығы келесі факторлармен негізделеді:

Сенімділікті бағалау: Ресурс мөлшері төмен бөлшектерді (мысалы, тісті дөңгелектер, мойынтіректер немесе тығыздағыштар) алдын ала анықтау бүкіл механизмнің апатсыз жұмыс істеу уақытын дәл болжауға мүмкіндік береді;

Диагностиканың оңтайлы параметрі: 6-суретте көрсетілгендей, диагностикалық шараларды өткізудің ең тиімді уақыт аралығы мен зерттелетін үлгілердің (сынамалардың) қажетті саны нақты статистикалық деректер негізінде белгіленеді;

Экономикалық тиімділік: Бөлшектердің тозу қарқындылығын бақылау арқылы жоспардан тыс жөндеу шығындарын азайтуға және техникалық қызмет көрсету кестесін оңтайландыруға жағдай жасалады.

Осылайша, диагностиканың оңтайлы уақытын дұрыс таңдау және алынған үлгілер санын нақты белгілеу редуктордың қызмет ету мерзімін ұзартудың негізгі кепілі болып табылады.



6 - сурет. Диагностиканың оңтайлы уақытын және алынған үлгілердің санын белгілеу

Графикте (6-сурет) $\delta, \%$ – бөлшектердің тозуы пайызбен; R – машинаның жұмыс істеу уақыты маш.сағ.; $R_{\min 1}, R_{\min 2}, R_{\min 3}$ – 1, 2 және 3-ші бөлшектердің минималды ресурс мәндері, $R_{\max 1}, R_{\max 2}, R_{\max 3}$ – олардың максималды мәндері.

Агрегаттың жұмыс істеу уақыты $R_{\max 2}$ -ге жеткенде, соңғысы алынып, күрделі жөндеуге жіберілуі керек. $R_{\min 1}$ -ден $R_{\max 2}$ -ге дейінгі диапазонға $R_{\min 1}, R_{\min 2}, R_{\min 3}$ мәндері түседі.

Қорытынды

Агрегаттық жөндеу әдісі кезінде өздігінен жүретін тау-кен машиналарының жұмыс қабілеттілігін арттыру олардың агрегаттарының сенімді жұмысын ресурстық

диагностикалау әдістері мен құралдары арқылы арттыру жолымен қол жеткізіледі. Бұл майды спектрлік талдау әдістері мен құралдарының көмегімен істен шығулардың алдын алу арқасында апаттық жөндеулерге кететін шығындарды және осы жөндеулердегі машиналардың тоқтап тұруынан болатын шығындарды азайту арқылы қол жеткізілді, бұл агрегаттың алынғанға дейінгі болжамды және қалдық ресурсын анықтауға мүмкіндік береді.

Бұл жабдықтар кен өндіру процесінде маңызды рөл атқарады, алайда олардың сенімді әрі үздіксіз жұмыс істеуі техникалық қызмет көрсету мен жөндеу жүйесінің тиімділігіне тікелей байланысты. Тәжірибе көрсеткендей, жерасты техникаларын жөндеудің дәстүрлі әдістері қазіргі өндірістік талаптарға толық сәйкес келмейді және тиімділігі төмен.

Өздігінен жүретін жабдықтардың тиімділігінің төмендеуінің негізгі себептерінің бірі – машиналар мен олардың негізгі тораптарының техникалық жағдайын тұрақты бақылауға мүмкіндік беретін диагностикалық әдістердің жеткіліксіз қолданылуы. Мұндай бақылаудың болмауы жабдықтардың күтпеген жерден істен шығуына, өндірістік процестің баяулауына және жөндеу шығындарының артуына әкеледі.

Сондықтан диагностикалық деректер негізінде қондырғылардың болжамды және қалған қызмет ету мерзімін анықтау техникалық қызмет көрсетуді жоспарлауға, апаттардың алдын алуға және жабдықтарды пайдалану тиімділігін арттыруға мүмкіндік береді.

Авторлар қосқан үлесі

М.Ә. Жұманов – зерттеу тұжырымдамасы мен жүйе архитектурасын әзірлеу, мақаланы жазу, нәтижелерді интерпретациялау, мақаланың жариялауға арналған соңғы нұсқасын бекіту, деректердің тұтастығы мен дұрыстығына жауапкершілік;

Қ.Д. Байжуманов – деректерді жинау, эксперименттік жұмыстарды жүргізу, нәтижелерді интерпретациялау;

Н.С. Камзанов – деректерді жинау, нәтижелерді талдау, мақаланың жекелеген бөлімдерін жазу;

Е.Б. Калиев – деректерді жинау, нәтижелерді интерпретациялау;

Р.А. Козбагаров – деректерді жинау, нәтижелерді интерпретациялау.

Барлық авторлар мақаланың соңғы нұсқасымен танысып, оны мақұлдады.

Әдебиеттер тізімі

1. Голик В.И. Подземная разработка рудных месторождений. Вологда: Инфра-Инженерия, 2022. ISBN 978-5-9729-0793-9.-кітап
2. Анушенков А.Н., Ахпашев Б.А., Долков Е.П. Подземная геотехнология. Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2017. ISBN 978-5-7638-3725-4.-кітап
3. Шакенов А., Сладковский А., Столповских И. Влияние состояния автомобильных дорог на срок службы шин карьерного самосвала. Научный вестник Национального горного университета. 2022, 6, р. 25-29. ISSN 2071-2227, eISSN 2223-2362. Доступно в: <https://doi.org/10.33271/nvngu/2022-6/025>. - мақала

4. Сладковский А., Утегенова А., Колга А. Д., Гавришев С. Е., Столповских И., Таран И. Повышение эффективности использования самосвалов в условиях работы на открытых горнодобывающих предприятиях. Научный вестник Национального горного университета 2019, 2, р. 36-42. ISSN 2071-2227, eISSN 2223-2362. Доступно в: <https://doi.org/10.29202/nvngu/2019-2/8>.- мақала
5. Kyrgyzbay B., Zhumanov M., Kaliyev Y., Kamzanov N., Baikenzhe N., Kozbagarov R. Predicting residual life of TORO-40D units using the oil spectral analysis method. Communications - Scientific letters of the University of Zilina. 2025, 27(3), p. B208-B215, Available online: DOI:10.26552/com.C.2025.040-мақала
6. Rakhmangulov A., Burmistrov K., Osintsev N. Multi-criteria system's design methodology for selecting open pits dump trucks. Sustainability. 2024, 16(2), 863. eISSN 2071-1050. Available from: <https://doi.org/10.3390/su16020863>- мақала
7. Bodziony, P.; Kasztelewicz, Z.; Sawicki, P. The problem of multiple criteria selection of the surface mining haul trucks. Archives of Mining Sciences. 2016, 61(2), p.223-243. ISSN: 0860-700, eISSN: 1689-0469. Available online: DOI:10.1515/amsc-2016-0017 мақала
8. Гудков А.Г., Кузнецов В.В. Диагностика горных машин и оборудования. – Москва: Недра, 2019. – 312 с
9. Тарасенко А.П., Лобанов Д.В. Надежность и техническая диагностика горных машин. – Санкт-Петербург: Лань, 2020. – 256 с
10. Кравченко В.И. Техническое обслуживание и ремонт горного оборудования. – Москва: Горная книга, 2018. – 280 с
11. Gupta S., Kumar U. Maintenance Engineering and Management of Mining Machinery. – CRC Press, 2021. – 340 p
12. Mobley R.K. An Introduction to Predictive Maintenance. – 3rd ed. – Elsevier, 2020. – 432 p
13. Jardine A.K.S., Lin D., Banjevic D. A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2006. – Vol. 20. – P. 1483–1510
14. Lei Y., Li N., Guo L., Li N., Yan T., Lin J. Machinery health prognostics: A systematic review from data acquisition to remaining useful life prediction // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2018. – Vol. 104. – P. 799–834
15. Randall R.B. Vibration-based Condition Monitoring. – John Wiley & Sons, 2011. – 320 p

**М.А. Жуманов¹, К.Д. Байжуманов¹, Н.С. Камзанов^{2*}, Е.Б. Калиев³,
Р.А. Козбагаров³**

¹Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан

²Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И.

Сатбаева, Алматы, Казахстан

³АЛТ Университет имени М.Тынышпаева, Алматы, Казахстан

Повышение работоспособности шахтных самосвалов TORO-40D путем выбора рациональных методов

Аннотация. В подземных рудниках корпорации «Казакхмыс» в последние годы всё чаще наблюдаются значительные простои. На этих рудниках используется большое количество высокопроизводительного самоходного оборудования с различными пневмоколёсными приводами. Практика показывает, что применение устаревших методов и средств ремонта подземных самоходных установок не в полной мере соответствует современным производственным требованиям и является неэффективным. Одной из основных причин снижения эффективности самоходного оборудования является недостаточное использование диагностических методов и средств, позволяющих осуществлять непрерывный контроль технического состояния каждой машины и её основных узлов. Отсутствие такой системы контроля приводит к внезапным отказам оборудования, замедлению производственного процесса и увеличению затрат на ремонт. Для предотвращения отказов после определённого времени работы необходимо на основе диагностических данных определять прогнозируемый и остаточный срок службы каждой установки. В данной статье рассматриваются основные результаты проведённых исследований, направленных на прогнозирование остаточного срока службы деталей машин, применяемых на рудниках корпорации «Казакхмыс», а также анализируются возможности использования полученных данных в производственной практике.

Ключевые слова: диагностика, автосамосвал, колесный редуктор, спектральный анализ, агрегатный метод ремонта, ресурс оборудования

**M.A. Zhumanov¹, K.D. Baizhumanov², N.S. Kamzanov^{3*}, Ye.B. Kaliyev⁴,
R.A. Kozbagarov⁵**

^{1,2}Al Farabi Kazakh National University, Almaty, Republic of Kazakhstan

³Kazakh National Research Technical University, Republic of Kazakhstan

^{4,5}Mukhametzhn Tynyshbayev ALT University, Almaty, Republic of Kazakhstan

Improving the performance of TORO-40D mining dump trucks by selecting rational methods

Abstract. In recent years, significant downtime has been increasingly observed in the underground mines of the Kazakhmys Corporation. A large number of high-performance self-propelled machines with various pneumatic wheel drives are used in these mines. Practice shows that the use of outdated methods and tools for repairing underground self-propelled equipment does not fully meet modern production requirements and is therefore inefficient. One of the main reasons for the reduced efficiency of self-propelled equipment is the insufficient use of diagnostic methods and tools that enable continuous monitoring of the technical condition of each machine and its main components. To prevent failures, after a certain period of operation, it is necessary to determine the predicted and remaining service life of each unit based on diagnostic data. This article presents the main results of studies aimed at predicting the remaining service life of machine components used in the mines of Kazakhmys Corporation, and analyzes the possibilities of applying the obtained data in industrial practice.

Keywords: diagnostics, dump truck, wheel gearbox, spectral analysis, aggregate repair

method, resource, equipment

References

1. Golik V.I. Podzemnaya razrabotka rudnykh mestorozhdeniy [Underground Mining of Ore Deposits]. Vologda: Infra-Inzheneriya, 2022. ISBN 978-5-9729-0793-9. [in Russian].
2. Anushenkov A.N., Akhpashev B.A., Dolgov E.P. Podzemnaya geotekhnologiya [Underground Geotechnology]. Krasnoyarsk: Sibirskiy federalnyy universitet, 2017. ISBN 978-5-7638-3725-4. [in Russian].
3. Shakenov A., Sladkovskiy A., Stolpovskikh I. Vliyanie sostoyaniya avtomobilnykh dorog na srok sluzhby shin karernogo samosvala [Influence of Road Condition on the Service Life of Quarry Dump Truck Tires]. Nauchnyy vestnik Natsionalnogo gornogo universiteta [Scientific Bulletin of the National Mining University]. 6, 25–29 (2022). <https://doi.org/10.33271/nvngu/2022-6/025>. [in Russian].
4. Sladkovskiy A., Utegenova A., Kolga A.D., Gavrishev S.E., Stolpovskikh I., Taran I. Povyshenie effektivnosti ispolzovaniya samosvalov v usloviyakh raboty na otkrytykh gornodobyvayushchikh predpriyatiyakh [Improving the Efficiency of Dump Truck Operation at Open-Pit Mining Enterprises]. Nauchnyy vestnik Natsionalnogo gornogo universiteta [Scientific Bulletin of the National Mining University]. 2, 36–42 (2019). <https://doi.org/10.29202/nvngu/2019-2/8>. [in Russian].
5. Kyrgyzbay B., Zhumanov M., Kaliyev Y., Kamzanov N., Baikenzhe N., Kozbagarov R. Predicting residual life of TORO-40D units using the oil spectral analysis method. Communications – Scientific Letters of the University of Zilina. 27(3), B208–B215 (2025). <https://doi.org/10.26552/com.C.2025.040>. [in English].
6. Rakhmangulov A., Burmistrov K., Osintsev N. Multi-criteria system’s design methodology for selecting open pits dump trucks. Sustainability. 16(2), 863 (2024). <https://doi.org/10.3390/su16020863>. [in English].
7. Bodziony P., Kasztelewicz Z., Sawicki P. The problem of multiple criteria selection of the surface mining haul trucks. Archives of Mining Sciences. 61(2), 223–243 (2016). <https://doi.org/10.1515/amsc-2016-0017>. [in English].
8. Гудков А.Г., Кузнецов В.В. Диагностика горных машин и оборудования. – Москва: Недра, 2019. – 312 с
9. Тарасенко А.П., Лобанов Д.В. Надежность и техническая диагностика горных машин. – Санкт-Петербург: Лань, 2020. – 256 с
10. Кравченко В.И. Техническое обслуживание и ремонт горного оборудования. – Москва: Горная книга, 2018. – 280 с
11. Gupta S., Kumar U. Maintenance Engineering and Management of Mining Machinery. – CRC Press, 2021. – 340 p
12. Mobley R.K. An Introduction to Predictive Maintenance. – 3rd ed. – Elsevier, 2020. – 432 p
13. Jardine A.K.S., Lin D., Banjevic D. A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2006. – Vol. 20. – P. 1483–1510
14. Lei Y., Li N., Guo L., Li N., Yan T., Lin J. Machinery health prognostics: A systematic review from data acquisition to remaining useful life prediction // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2018. – Vol. 104. – P. 799–834

15. Randall R.B. Vibration-based Condition Monitoring. – John Wiley & Sons, 2011. – 320 p

Авторлар туралы мәлімет:

М.Ә. Жұманов – т.ғ.к., доцент, қауымдастырылған профессор, Әл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық Университеті, әл-Фараби даңғылы, 71, Алматы, Қазақстан.

Қ.Д. Байжуманов – т.ғ.к., доцент, қауымдастырылған профессор, Әл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық Университеті, әл-Фараби даңғылы, 71, Алматы, Қазақстан.

Н.С. Камзанов – PhD докторы, қауымдастырылған профессор, Қ.И.Сәтбаев атындағы Қазақ Ұлттық Техникалық Зерттеу Университеті, Сәтпаев көшесі 22, Алматы қаласы, Қазақстан.

Е.Б. Калиев – т.ғ.к., қауымдастырылған профессор, М.Тынышбаев атындағы АЛТ Университеті, Шевченко көшесі, 97, Алматы, Қазақстан.

Р.А. Козбагаров – т.ғ.к., қауымдастырылған профессор, М.Тынышбаев атындағы АЛТ Университеті, Шевченко көшесі, 97, Алматы, Қазақстан.

М.А. Жуманов – к. т. н., доцент, ассоциированный профессор, Казахский национальный университет имени аль-Фараби, проспект Аль-Фараби 71, Алматы, Казахстан.

Қ.Д. Байжуманов – к. т. н., доцент, ассоциированный профессор, Казахский национальный университет имени аль-Фараби, проспект Аль-Фараби 71, Алматы, Казахстан.

Н.С. Камзанов – доктор PhD, ассоциированный профессор, Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сәтбаева, ул. Сәтбаева, 22, Алматы, Казахстан.

Е.Б. Калиев – к. т. н., ассоциированный профессор, АЛТ Университет имени М. Тынышпаева, ул. Шевченко, 97, Алматы, Казахстан.

Р.А. Козбагаров – кандидат технических наук, доцент, ассоциированный профессор, АЛТ Университет имени М.Тынышпаева, ул. Шевченко, 97, Алматы, Казахстан.

M.A. Zhumanov – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Al-Farabi Kazakh National University, 71 Al-Farabi Avenue, Almaty, Kazakhstan.

K.D. Baizhumanov – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Al-Farabi Kazakh National University, 71 Al-Farabi Avenue, Almaty, Kazakhstan.

N.S. Kamzanov – PhD, Associate Professor, Kazakh National Research Technical University, 22 Satpayev St., Almaty, Kazakhstan.

Ye.B. Kaliyev – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, ALT University named after M. Tynyshbayev, 97 Shevchenko St., Almaty, Kazakhstan.

R.A. Kozbagarov – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, ALT University named after M. Tynyshbayev, 97 Shevchenko St., Almaty, Kazakhstan.



Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)



МРНТИ 73.31.81

Научная статья

<https://doi.org/10.32523/2616-7263-2026-154-1-149-165>

Архитектура интеллектуальной системы вибрационной диагностики транспортных средств и методика анализа вибрационных сигналов

М.Ж. Куатова^{1,2} , О. Кумархан¹ , Д.Б. Акпанбетов² ,
А.Ж. Абекова^{1,3*} 

¹Институт механики и машиноведения имени академика У.А. Джолдасбекова,
Алматы, Казахстан

²Международный инженерно-технологический университет, Алматы, Казахстан

³ Satbayev University, Алматы, Казахстан

E mail: ¹kuatova.moldyr@gmail.com, ¹oraz.9801@gmail.com, d.akpanbetov@metu.kz,
^{*}Abekova310792@gmail.com

Аннотация. В статье рассматриваются вопросы разработки методики анализа вибрационных сигналов и формирования концепции архитектуры интеллектуальной системы вибрационной диагностики транспортных средств. Актуальность исследования обусловлена необходимостью повышения надежности и безопасности эксплуатации транспортных систем в условиях цифровизации и внедрения киберфизических технологий. В качестве основного метода обработки выбран спектральный анализ на базе быстрого преобразования Фурье, который позволяет выявлять доминирующие частотные компоненты и формировать диагностические признаки. Представлена экспериментальная реализация регистрации вибрационных ускорений с использованием многоканальных акселерометрических датчиков и цифровая обработка данных с расчетом интегральных и спектральных параметров. Предложенная архитектура предусматривает масштабируемость и модульность для адаптации к различным типам транспортных средств. Реализованный подход может стать основой для развития современных систем интеллектуальной диагностики в транспортной отрасли, способных эффективно предотвращать поломки и повышать эксплуатационную готовность транспортных средств.

Ключевые слова: вибрационная диагностика, быстрое преобразование Фурье, мониторинг технического состояния, киберфизические системы, предиктивная диагностика.

Введение

Цифровизация и внедрение киберфизических систем в автомобилестроении формируют устойчивую потребность в развитии интеллектуальных средств мониторинга технического состояния оборудования и транспортных средств. Усложнение конструкций приводных систем, рост доли электрических и автоматизированных транспортных комплексов, а также повышение требований к надёжности и безопасности эксплуатации обуславливают необходимость применения диагностических методов, обеспечивающих раннее выявление отклонений в работе механических узлов.

Обзор литературы

Одним из наиболее информативных и широко применяемых методов мониторинга технического состояния транспортных систем является вибрационная диагностика. Теоретические основы вибрационного анализа и его применение в машиностроении подробно рассмотрены в фундаментальных работах [1, 2]. Анализ вибрационных сигналов позволяет оценивать состояние приводов, редукторов, элементов ходовой части и узлов крепления груза, прогнозировать развитие неисправностей и реализовывать обслуживание по состоянию, что особенно важно для транспортных средств, функционирующих в условиях переменных нагрузок и скоростей [1, 2].

Эффективность вибрационной диагностики в значительной степени определяется корректным выбором методов обработки измеренных сигналов. К классическим подходам относятся временно-частотные методы анализа, включая вейвлет-преобразование и эмпирическую модальную декомпозицию [3], а также методы спектральной куртозы, позволяющие выявлять нестационарные процессы и локальные дефекты в механических узлах [4, 5]. Для анализа вибраций вращающихся элементов широко применяются методы ордер-треккинга и огибающего анализа [6], а также кепстральные методы, используемые для диагностики дефектов зубчатых передач и подшипников [7]. Применение корреляционного и спектрального анализа способствует разделению технологических и эксплуатационных источников вибраций и повышению достоверности диагностических выводов [8].

В последние годы значительное развитие получили методы автоматизированной обработки вибрационных данных на основе машинного обучения и глубоких нейронных сетей. В обзорных исследованиях показано, что свёрточные и рекуррентные нейронные сети способны эффективно классифицировать техническое состояние машин и механизмов по вибрационным сигналам, снижая зависимость диагностики от экспертных настроек [8–9]. Для диагностики транспортных и приводных систем предложены специализированные архитектуры глубокого обучения, адаптированные к нестационарным режимам работы и изменяющимся условиям эксплуатации [10, 11]. Современные интеллектуальные методы диагностики рассматриваются как основа для построения систем прогнозирования остаточного ресурса и обслуживания по состоянию [12–14].

Развитие интеллектуальных транспортных систем и электрических приводов обусловило рост исследований, направленных на вибрационную диагностику именно в контексте автомобилестроения. Показано, что для электрических и гибридных транспортных средств характерны специфические источники вибраций, связанные с работой электроприводов и трансмиссий, что требует адаптации методов анализа и архитектур диагностических систем [15–16]. В работах последних лет подчёркивается необходимость интеграции вибрационной диагностики с оценкой NVH-характеристик для

комплексного анализа технического состояния и эксплуатационного комфорта транспортных средств [16,17].

Недавние исследования в области интеллектуальной вибрационной диагностики транспортных средств ориентированы на разработку распределённых и иерархических систем мониторинга, объединяющих сенсорный уровень, встроенную обработку данных и интеллектуальный анализ. Применение глубоких нейронных сетей и гибридных архитектур анализа данных позволяет автоматизировать выявление дефектов автомобильных редукторов, приводов и трансмиссий в условиях переменных режимов эксплуатации [18–19]. Отдельное внимание уделяется вопросам устойчивости диагностических моделей к шумам и внешним возмущениям, характерным для реальных условий движения транспортных средств [20].

Развитие измерительной базы также является важным фактором повышения эффективности интеллектуальных систем вибрационной диагностики. Использование микромеханических акселерометров и оптических систем измерения вибраций позволяет реализовать распределённый мониторинг динамических процессов и повысить точность регистрации вибрационных сигналов [18]. Интеграция сенсорных систем с цифровыми платформами мониторинга рассматривается как основа для построения киберфизических диагностических систем транспортных средств.

Анализ современных научных работ показывает актуальность разработки формализованной методики анализа и обработки вибрационных сигналов, ориентированной на условия эксплуатации транспортных средств и мобильных транспортных комплексов. В данной работе основное внимание уделяется разработке методики анализа вибрационных сигналов с использованием спектрального анализа на основе быстрого преобразования Фурье как универсального и воспроизводимого инструмента оценки вибрационного состояния механических узлов. Предлагаемая методика рассматривается как самостоятельный инженерный инструмент, который на последующем этапе используется при формировании архитектуры интеллектуальной системы вибрационной диагностики транспортных средств.

Научная новизна работы заключается в формализации методики обработки и анализа вибрационных сигналов транспортных систем на основе экспериментально зарегистрированных данных и в разработке концепции архитектуры интеллектуальной системы вибрационной диагностики, интегрирующей сенсорный уровень регистрации вибрационных ускорений, аналитический уровень спектральной обработки сигналов и интеллектуальный уровень анализа данных. Предложенный подход даст возможность использовать полученные спектральные признаки в системах интеллектуальной диагностики и предиктивного мониторинга технического состояния транспортных средств.

Методология

Предлагаемая методика анализа вибрационных сигналов основана на последовательной обработке измеряемых ускорений с целью получения информативных спектральных признаков, характеризующих техническое состояние механических узлов транспортного средства. Методика включает этапы регистрации сигнала, предварительной обработки (калибровка, фильтрация, удаление постоянной

составляющей), спектрального анализа и формирования диагностических показателей. Для уменьшения спектральных утечек перед выполнением быстрого преобразования Фурье к анализируемому сигналу предлагается применить окно Ханна. Использование оконной функции обусловлено тем, что при анализе конечного фрагмента сигнала предполагается его периодическое продолжение, что при наличии скачков на границах временного интервала приводит к искажению спектра. Схематично последовательность обработки представлена на (рисунок 1).



Рисунок 1 – Блок-схема методики анализа и обработки вибрационных сигналов

Регистрация вибрационных сигналов осуществлялась с использованием акселерометрических датчиков, установленных в диагностически значимых точках конструкции исследуемого узла. В качестве измерительных модулей применялись цифровой трёхосевой акселерометр MPU6050, предназначенный для регистрации низко- и среднечастотных вибраций, а также аналоговый акселерометр ADXL377, обеспечивающий фиксацию высокоамплитудных ускорений. Считывание данных выполнялось микроконтроллером Arduino Nano с последующей записью измерений на карту памяти microSD в формате CSV. Такая конфигурация обеспечивала автономность измерений и возможность последующей офлайн-обработки данных в специализированной программной среде. Контроль корректности работы измерительного модуля осуществлялся через интерфейс Serial Monitor Arduino IDE. На рисунке 2 представлен экспериментальный измерительный модуль для регистрации вибраций двигателя (рисунок 2).



Рисунок 2 – Экспериментальный измерительный модуль для регистрации вибраций двигателя

Акселерометрические датчики крепились к корпусу исследуемого двигателя с обеспечением жёсткой механической связи, что позволяло минимизировать паразитные колебания и повысить достоверность регистрации вибрационных ускорений. Перед началом измерений выполнялась автоматическая калибровка датчиков в неподвижном состоянии, позволяющая определить нулевые смещения по измерительным осям и компенсировать постоянную составляющую сигнала. В рамках экспериментального

исследования была выполнена регистрация вибрационных ускорений с использованием инерциальных датчиков, подключённых к системе сбора данных через последовательный интерфейс. Измеренные значения ускорений сохранялись в CSV-файл с временной привязкой каждого отсчёта. Файл содержал синхронные данные по трём осям акселерометров. Для последующего анализа был выбран сигнал ускорения по оси Z акселерометра MPU6050 как наиболее чувствительный к направлению вибрационного воздействия. Таблица 1 демонстрирует фрагмент зарегистрированного массива данных, содержащего временные отметки и значения ускорений, полученные с использованием инерциальных сенсоров MPU. Полученные временные ряды использовались в дальнейшем для проведения спектрального анализа методом быстрого преобразования Фурье и определения частотных характеристик вибрационных процессов исследуемого объекта.

Таблица 1 – Фрагмент зарегистрированных вибрационных данных (VIB.csv)

Время, мс	MPU_x	MPU_y	MPU_z
4376	-59.34	53.56	-0.44
4401	64.66	89.56	11.56
4425	36.66	29.56	-140.44
4451	-23.34	33.56	-100.44
4475	-11.34	-46.44	-20.44
4500	28.66	25.56	39.56
4525	-39.34	-98.44	-232.44
4550	-31.34	-42.44	11.56
4575	-91.34	17.56	-0.44
4599	-7.34	133.56	7.56
4624	-23.34	-34.44	-92.44
4658	-35.34	-30.44	55.56
4682	100.66	37.56	51.56
4707	76.66	53.56	107.56
4731	12.66	-46.44	151.56
4757	-7.34	-38.44	27.56
4782	-3.34	-30.44	-8.44
4806	68.66	-10.44	27.56

4831	44.66	-74.44	99.56
4855	108.66	-2.44	-20.44
4881	-3.34	-82.44	107.56
4905	36.66	21.56	-16.44
4930	-75.34	-82.44	91.56
4959	-11.34	37.56	-40.44
4983	-23.34	1.56	159.56
5008	48.66	77.56	103.56
5032	-19.34	-6.44	71.56
5057	-35.34	41.56	27.56
5083	-43.34	25.56	-44.44
5107	-55.34	13.56	-176.44
5132	-7.34	-38.44	95.56
5156	8.66	9.56	-136.44
5181	-3.34	-50.44	-68.44
5207	-39.34	65.56	51.56
5231	44.66	5.56	51.56
5256	8.66	53.56	-24.44
5283	-43.34	37.56	-108.44

Во временной реализации (рисунок 3) отчётливо прослеживается переход от состояния покоя к рабочему режиму двигателя. В начальный момент наблюдается низкоамплитудный шумовой сигнал. После включения двигателя фиксируется резкое увеличение амплитуды колебаний, появление квазипериодических колебаний и импульсных компонентов. Перед выполнением спектрального анализа проводилась предварительная обработка сигнала.

Регистрация вибрационных сигналов осуществлялась при фиксированной частоте дискретизации 200 Гц, что в соответствии с теоремой Найквиста обеспечивает корректное представление спектра вибрационных сигналов в диапазоне частот до 100 Гц. Указанный диапазон охватывает основные низко- и среднечастотные компоненты вибраций, характерные для динамических процессов в транспортных системах, включая колебания приводных механизмов, элементов трансмиссии и конструктивных узлов. Таким образом, выбранная частота дискретизации является достаточной для проведения спектрального анализа вибрационных сигналов и формирования диагностических признаков в рамках

рассматриваемой методики. Как уже упоминалось, измеренные значения ускорений по трём ортогональным осям сохранялись для последующего анализа. В дальнейшем для спектральной обработки использовалась ось, наиболее чувствительная к направлению основного вибрационного воздействия.

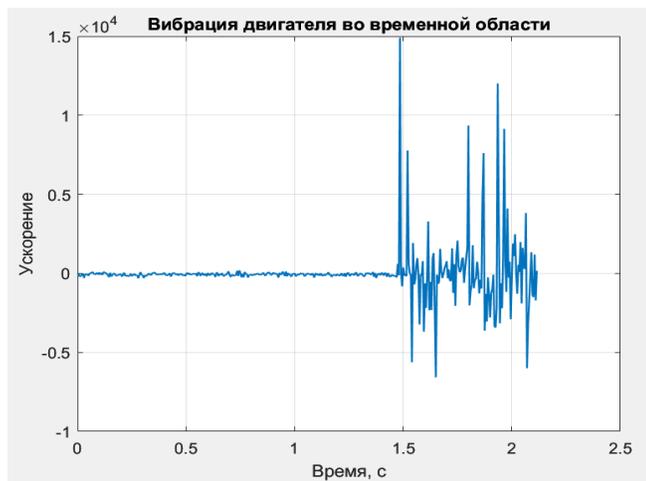


Рисунок 3 – Вибрация двигателя во временной области

Анализ проводился в диапазоне 1–100 Гц, что соответствует рабочему диапазону вибраций исследуемого двигателя. На амплитудном спектре (рисунок 4) отчётливо выделяется доминирующая частота порядка 86 Гц. Данная частота соответствует эквивалентной скорости вращения двигателя около 5200 об/мин, что согласуется с его рабочим режимом. Наличие выраженных гармонических составляющих свидетельствует о регулярной природе вибрационного процесса.

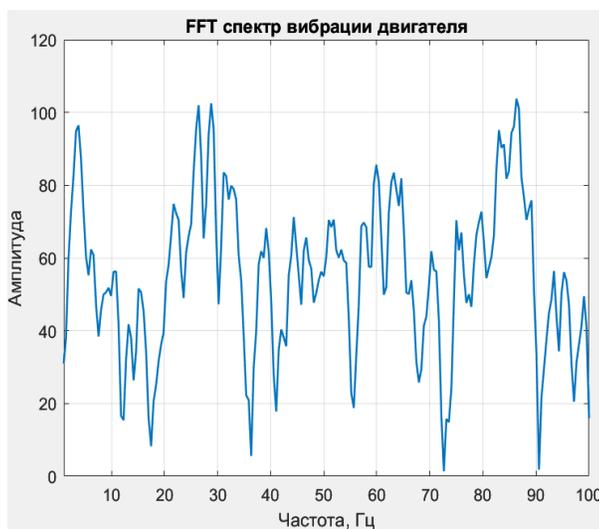


Рисунок 4 – FFT-спектр вибрации двигателя

Спектральный анализ позволяет определить основную частоту вибрации, амплитуду доминирующей гармоники, характер распределения спектральной энергии по частотному диапазону, а также среднеквадратичное значение вибрации (RMS), рассматриваемое как интегральный количественный показатель уровня динамической нагрузки механического узла. В процессе спектрального анализа вибрационных сигналов формируется набор диагностических признаков, используемых для количественной оценки вибрационного состояния исследуемого объекта. Основные диагностические признаки, используемые в работе, представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Диагностические признаки вибрационного сигнала

Диагностический признак	Обозначение	Способ определения	Назначение
Основная частота вибрации	f_0	частота максимума амплитудного спектра FFT	определение режима работы механического узла
Амплитуда доминирующей гармоники	A	амплитуда соответствующего спектрального пика	оценка интенсивности вибрации
Среднеквадратичное значение	RMS	вычисление по временной реализации сигнала	интегральная оценка уровня динамической нагрузки
Спектральная энергия	E	интегрирование спектральной плотности	анализ распределения вибрационной энергии

Полученные результаты предварительно подтверждают корректность реализованной экспериментальной установки и выбранной методики цифровой обработки сигналов. В рамках предложенной методики анализ вибрационных сигналов осуществляется в несколько последовательных этапов, включающих регистрацию вибрационных ускорений с использованием акселерометрических датчиков, формирование временных рядов измерений и предварительную обработку сигналов. На этапе аналитической обработки выполняется спектральный анализ методом быстрого преобразования Фурье, позволяющий перейти от временного представления сигнала к его частотной структуре. На основе полученного спектра формируется набор диагностических признаков, включающий доминирующую частоту вибрации, амплитуды спектральных гармоник, распределение спектральной энергии и среднеквадратичное значение вибрации. Сформированные спектральные признаки послужат основой для последующей интеграции в интеллектуальные алгоритмы диагностики и автоматической классификации технического состояния транспортных систем.

Результаты и обсуждение

На основе разработанной методики спектрального анализа вибрационных сигналов предлагается концепция архитектуры интеллектуальной системы вибрационной диагностики транспортных средств, ориентированная на комплексное объединение сенсорного уровня регистрации данных, аналитического уровня цифровой обработки и интеллектуального уровня интерпретации результатов. В отличие от существующих решений, в которых акцент делается преимущественно либо на алгоритмах обработки сигналов, либо на машинном обучении, предложенная архитектура формируется исходя из последовательной интеграции физического измерения, математической обработки и интеллектуального анализа, что соответствует современным подходам к построению распределённых диагностических систем транспортных средств [15, 18].

Интеллектуальная система вибрационной диагностики в рамках настоящей работы рассматривается как многоуровневая распределённая структура, обеспечивающая непрерывный переход от регистрации динамических параметров к формированию диагностического решения. На сенсорном уровне реализуется метод многоканальной регистрации вибрационных ускорений с использованием акселерометрических датчиков, размещённых в диагностически значимых точках конструкции транспорта. Регистрация осуществляется по ортогональным осям, что позволяет учитывать пространственный характер колебательных процессов и формировать информативный массив первичных данных, отражающих реальное динамическое состояние объекта. Использование многоканальной регистрации обеспечивает повышение чувствительности к локальным дефектам и соответствует современным требованиям к системам мониторинга автомобильных приводов и трансмиссий.

Собранные данные передаются на уровень сбора и хранения, где выполняется их временная синхронизация и структурированное сохранение. Такой подход обеспечивает автономность эксперимента, воспроизводимость обработки и возможность последующего офлайн-анализа, что является важным элементом распределённых диагностических платформ в транспортных системах [18]. Наличие структурированного массива данных создаёт основу для построения масштабируемых систем мониторинга, интегрируемых с цифровыми платформами эксплуатации.

Аналитический уровень архитектуры формируется на основе методики, представленной в предыдущей главе. На данном этапе выполняется предварительная цифровая обработка вибрационных сигналов, включающая устранение постоянной составляющей, очистку данных от некорректных значений и нормализацию временных рядов. Для количественной оценки вибрационной активности рассчитываются интегральные показатели, в частности среднеквадратичное значение вибрации, характеризующее общий уровень динамической нагрузки. Ключевым этапом аналитического уровня является спектральный анализ методом быстрого преобразования Фурье, позволяющий перейти от временного представления сигнала к частотному и выявить доминирующие частотные компоненты, связанные с режимами работы и конструктивными особенностями транспортного узла. Такой подход соответствует современным исследованиям в области интеллектуального мониторинга автомобильных трансмиссий и электрических приводов, где частотные признаки рассматриваются как основа для построения диагностических моделей [15]. Результаты аналитического уровня

формируют набор информативных временных и спектральных признаков, отражающих динамическое состояние механической системы. Эти признаки могут быть использованы на интеллектуальном уровне архитектуры для решения задач классификации технического состояния, оценки режимов работы и построения предиктивных моделей. Последние исследования показывают, что применение алгоритмов машинного обучения, включая нейронные сети и гибридные архитектуры анализа данных, существенно повышает точность диагностики автомобильных узлов в условиях переменных режимов эксплуатации. При этом устойчивость моделей к шумам и внешним возмущениям, характерным для реального движения транспортных средств, является ключевым фактором практической применимости системы. Формализованная структурная блок-схема архитектуры интеллектуальной системы вибрационной диагностики приведена на рисунке 5.



Рисунок 5 – Формализованная архитектура интеллектуальной системы вибрационной диагностики транспортных средств

Интеграция предлагаемой архитектуры с системами оценки NVH-характеристик и цифровыми платформами мониторинга позволяет реализовать обслуживание по состоянию и элементы предиктивной диагностики транспортных комплексов. Такой подход соответствует концепции киберфизических систем и интеллектуальных транспортных платформ, в которых измерение, обработка и принятие решений объединены в единую цифровую среду. В отличие от существующих подходов, в которых, как правило, рассматриваются отдельные методы обработки вибрационных сигналов или алгоритмы интеллектуальной диагностики [8– 14, 18– 20], предлагаемая архитектура объединяет сенсорный уровень регистрации вибрационных ускорений, аналитический уровень спектральной обработки сигналов и интеллектуальный уровень анализа данных в рамках единой диагностической структуры. Предлагаемая архитектура ориентирована на масштабируемость и адаптацию к различным типам транспортных средств, включая мобильные транспортные комплексы и электрические платформы.

Представленная архитектура носит концептуальный характер и в настоящее время находится на стадии разработки. Реализована и экспериментально апробирована сенсорная и аналитическая часть системы, включающая регистрацию вибрационных сигналов и спектральную обработку методом FFT. Дальнейшая работа будет направлена на разработку и верификацию интеллектуального уровня системы, формирование обучающих выборок и оценку точности классификации технического состояния в условиях реальной эксплуатации. Особое внимание планируется уделить экспериментальной проверке устойчивости алгоритмов к изменяющимся режимам работы и интеграции системы в цифровые платформы мониторинга транспортных средств.

Предложенная архитектура формирует основу для перехода от изолированной обработки вибрационных сигналов к построению интеллектуальной системы мониторинга технического состояния транспортных средств.

Заключение

В статье рассмотрены вопросы разработки методики анализа вибрационных сигналов и формирования концепции архитектуры интеллектуальной системы вибрационной диагностики транспортных средств. Актуальность исследования обусловлена необходимостью повышения надёжности и безопасности эксплуатации современных транспортных систем в условиях цифровизации и внедрения киберфизических технологий.

В работе обоснован выбор спектрального анализа на основе быстрого преобразования Фурье в качестве базового метода обработки вибрационных сигналов. Показано, что применение FFT позволяет достоверно выделять доминирующие частотные компоненты, оценивать амплитудно-частотные характеристики вибрационного процесса и формировать информативные диагностические признаки, отражающие динамическое состояние механических узлов. Следует отметить, что метод быстрого преобразования Фурье предполагает квазистационарность анализируемого сигнала и может иметь ограничения при анализе резко изменяющихся режимов работы или нестационарных вибрационных процессов. В таких случаях для более точного анализа могут применяться временно-частотные методы обработки сигналов, включая вейвлет-анализ и методы огибающего анализа, позволяющие выявлять локальные изменения спектральных

характеристик во времени. В рамках настоящего исследования FFT используется как базовый инструмент спектрального анализа для формирования диагностических признаков, а применение более сложных методов анализа нестационарных сигналов рассматривается как направление дальнейших исследований.

Реализована экспериментальная схема регистрации вибраций с использованием многоканальных акселерометрических датчиков и выполнена цифровая обработка данных с расчётом интегральных и спектральных параметров.

На основе разработанной методики предложена концепция многоуровневой архитектуры интеллектуальной системы вибрационной диагностики, включающей сенсорный, аналитический и интеллектуальный уровни. Архитектура ориентирована на интеграцию методов спектральной обработки с алгоритмами машинного обучения и цифровыми платформами мониторинга, что обеспечивает переход от изолированного анализа сигналов к формированию систем обслуживания по состоянию и предиктивной диагностики. Предложенный подход соответствует современным тенденциям развития интеллектуальных транспортных систем и распределённых киберфизических диагностических комплексов.

Полученные результаты подтверждают возможность использования спектральных признаков вибрационных сигналов в качестве основы для построения интеллектуальных диагностических моделей. Разработанная методика и концептуальная архитектура создают фундамент для дальнейших исследований, направленных на верификацию интеллектуального уровня системы, оценку точности классификации технического состояния в условиях реальной эксплуатации и интеграцию диагностического модуля в цифровые платформы транспортных комплексов.

Таким образом, представленное исследование формирует методологическую и архитектурную основу для создания интеллектуальных систем вибрационной диагностики транспортных средств и может быть использовано при разработке распределённых систем мониторинга технического состояния в автомобилестроении и смежных областях машиностроения.

Благодарность, конфликт интересов

Данное исследование финансировалось за счет гранта Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (номер гранта: BR31715767).

Вклад авторов.

Куатова Молдир – концепция исследования и архитектуры системы, написание статьи, интерпретация результатов, утверждение окончательного варианта статьи для публикации, ответственность за целостность и достоверность данных;

Кумархан Ораз – сбор данных, проведение экспериментальных работ, интерпретация результатов;

Акпанбетов Дархан Берикович – сбор данных, анализ результатов, написание отдельных разделов статьи;

Абекова Айдана – сбор данных, интерпретация результатов.

Список литературы

1. Randall R. B. Vibration-based condition monitoring: Industrial, automotive and aerospace applications. Chichester: Wiley, 2011. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9781119961260> - книга
2. Калинов А. П. Анализ методов вибродиагностики электрических машин // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений. 2012. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-metodov-vibrodiagnostiki-asinhronnyh-dvigateley>-книга
3. Huang N. E. et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis // Proceedings of the Royal Society A. 1998. Vol. 454. P. 903–995. DOI: 10.1098/rspa.1998.0193-журнал
4. Antoni J. The spectral kurtosis: A useful tool for characterising non-stationary signals // Mechanical Systems and Signal Processing. 2006. Vol. 20, No. 2. P. 282–307. DOI: 10.1016/j.ymssp.2004.09.001- статья
5. Randall R. B. Applications of spectral kurtosis in machine diagnostics and prognostics // Key Engineering Materials. 2005. Vol. 293–294. P. 21–32. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.293-294.21-статья
6. Chen H., Li J.-m., Wang X.-B., Yu L.-Q., Yang Z.-X. Review of intelligent fault diagnosis for rotating machinery under imperfect data conditions // Expert Systems with Applications. 2025. Vol. 285. Article 127726. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2025.127726>-статья
7. Randall R. B. A history of cepstrum analysis for machine diagnostics // Mechanical Systems and Signal Processing. 2017. Vol. 97. P. 3–19. DOI: 10.1016/j.ymssp.2016.12.026- статья
8. Lei Y. et al. Applications of machine learning to machine fault diagnosis: A review and roadmap // Mechanical Systems and Signal Processing. 2020. Vol. 138. Article 106587. DOI: 10.1016/j.ymssp.2019.106587- статья
9. Zhao R. et al. Deep learning and its applications to machine health monitoring // Mechanical Systems and Signal Processing. 2019. Vol. 115. P. 213–237. DOI: 10.1016/j.ymssp.2018.05.050- статья
10. Nguyen V.-T., Diep Q. B. Vibration-based gearbox fault diagnosis using a multi-scale CNN with depth-wise feature concatenation // PLOS ONE. 2025. Vol. 20, No. 7. Article e0324905. DOI: 10.1371/journal.pone.0324905- статья
11. Wang X. et al. Bearing fault diagnosis based on vibro-acoustic data fusion and 1D-CNN network // Measurement. 2021. Vol. 173. Article 108518. DOI: 10.1016/j.measurement.2020.108518- статья
12. Wen L., Li X., Gao L., Zhang Y. A new convolutional neural network-based data-driven fault diagnosis method // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2018. Vol. 65, No. 7. P. 5990–5998. DOI: 10.1109/TIE.2017.2774777/ статья
13. Zhang S., Zhang S., Wang B., Habetler T. G. Deep learning algorithms for bearing fault diagnostics – A comprehensive review // IEEE Access. 2021. Vol. 9. P. 104518–104538. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2972859- статья
14. Rajesh K., Parameshwaran A. B., Sridharan N. V., Vaithyanathan S. Vibration-based fault diagnosis of automotive suspension systems using voting-based ensemble learning. Results in Engineering, 2025, Vol. 28, 107635. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.107635> -

статья

15. Bi Z., Yu X., Huangfu Y., Yao J., Zhou P., He Q., Peng Z. Vibration source inversion-based fault diagnosis: Approach and application // Journal of Sound and Vibration. 2025. Vol. 597, Part B. Article 118818. DOI: 10.1016/j.jsv.2024.118818- статья
16. Horváth K. Noise, vibration, and harshness (NVH) challenges in hydrogen internal combustion engine vehicles // Energy Science & Engineering. 2025. P. 1–14. DOI: 10.1002/ese3.70400- статья
17. Masri, J.; et al. A survey of modern vehicle noise, vibration, and harshness. Ain Shams Engineering Journal 2024, 15 (10): 102957. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2024.102957> -
18. Ali Y., Tlija M., Shah S. W., Arif A., Siddiqi M. R. Intelligent condition monitoring of gear system at variable load and variable speed using vibration data // Advances in Mechanical Engineering. 2025. Vol. 17, No. 9. DOI: 10.1177/16878132251364692- статья
19. Kumar P., Shih G.-L., Yao C.-K., Hayle S. T., Manie Y. C., Peng P.-C. Intelligent vibration monitoring system for smart industry utilizing optical fiber sensor combined with machine learning // Electronics. 2023. Vol. 12. Article 4302. DOI: 10.3390/electronics12204302- статья
20. Shah, R.; Mittal, V.; Lotwin, M. Recent Advances in Vibration Analysis for Predictive Maintenance of Modern Automotive Powertrains. Vibration 2025, 8, 68. <https://doi.org/10.3390/vibration8040068> - статья

М.Ж. Куатова^{1,2}, О. Кумархан¹, Д.Б. Акпанбетов², А.Ж. Абекова^{1,3*}

¹ Академик Ө.А. Жолдасбеков атындағы Механика және машинатану институты, Алматы, Қазақстан

² Халықаралық инженерлік-технологиялық университет, Алматы, Қазақстан

³ Satbayev University, Алматы, Қазақстан

Көлік құралдарының дірілдік диагностикасының зияткерлік жүйесінің архитектурасы және діріл сигналдарын талдау әдістемесі

Аңдатпа. Мақалада вибрациялық сигналдарды талдаудың әдістемесін әзірлеу мәселелері және көлік құралдарының вибрациялық диагностикасының зияткерлік жүйесінің архитектурасын құру қарастырылған. Зерттеудің өзектілігі – көлік жүйелерін пайдаланудың сенімділігі мен қауіпсіздігін арттыру қажеттілігінде, цифрландыру мен киберфизикалық технологияларды енгізу жағдайында. Негізгі әдіс ретінде Фурье тез түрлендіруіне (FFT) негізделген спектрлік талдау таңдалды, ол басты жиіліктік компоненттерді анықтауға және диагностикалық белгілерді қалыптастыруға мүмкіндік береді. Вибрациялық үдеулердің жазылуы үшін көпарнадағы акселерометрлер пайдаланыла отырып, эксперимент жүзеге асырылды және деректер цифрлық өңдеуден өткізіліп, интегралды және спектрлік параметрлер есептелді. Жасалған әдістемеге сүйене отырып, көп деңгейлі зияткерлік жүйе архитектурасының концепциясы ұсынылды, ол сенсорлық, аналитикалық және зияткерлік деңгейлерді қамтиды. Бұл тәсіл цифрлық мониторинг платформаларымен бірігу және күй бойынша қызмет көрсетуді жүзеге асыруға бағытталған, бұл диагностика тиімділігін және транспорт құралдарының жұмысқа қабілеттілігін арттырады. Ұсынылған архитектура масштабталатын және модульдік

болып табылады, әртүрлі көлік түрлеріне бейімделуге мүмкіндік береді. Бұл тәсіл қазіргі заманғы зияткерлік диагностика жүйелерін дамытуға негіз болуы мүмкін, ол ақауларды алдын алуға және көлік құралдарының жұмысқа дайындығын арттыруға мүмкіндік береді.

Түйін сөздер: дірілдік диагностика, жылдам Фурье түрлендіруі, техникалық жағдай мониторингі, киберфизикалық жүйелер, болжамдық диагностика.

M.Zh. Kuvatova^{1,2}, O. Kumarkhan¹, D.B. Akpanbetov², A.Zh. Abekova^{1,3*}

¹ U. Joldasbekov Institute of Mechanics and Engineering, Almaty, Kazakhstan

² International Engineering and Technological University, Almaty, Kazakhstan

³ Satbayev University, Almaty, Kazakhstan

Architecture of an Intelligent Vibration Diagnostics System for Vehicles and Methodology for Vibration Signal Analysis

Abstract. The article addresses issues related to developing methods for analyzing vibration signals and forming the architecture of an intelligent vehicle vibration diagnostics system. The relevance of the research stems from the need to enhance the reliability and safety of transportation systems amid digitalization and the implementation of cyber-physical technologies. The primary processing method chosen is spectral analysis based on the fast Fourier transform, which enables the identification of dominant frequency components and the formation of diagnostic features. An experimental implementation of vibration acceleration recording was carried out using multi-channel accelerometer sensors, and digital data processing was performed to calculate integral and spectral parameters. Based on this methodology, a concept for a multi-level architecture of an intelligent system was proposed, including sensor, analytical, and intellectual levels. This approach integrates with digital monitoring platforms and implements condition-based maintenance, increasing diagnostic efficiency and improving vehicle reliability. The developed approach can serve as a basis for advancing modern intelligent diagnostic systems in the transportation industry, capable of effectively preventing failures and increasing vehicle operational readiness.

Keywords: vibration diagnostics, Fast Fourier Transform (FFT), technical condition monitoring, cyber-physical systems, predictive diagnostics.

References

1. Randall R.B. Vibration-based Condition Monitoring: Industrial, Automotive and Aerospace Applications. Chichester: Wiley, 2011. Dostup: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9781119961260>
2. Kalinov A.P. Analiz metodov vibrodiagnostiki elektricheskikh mashin. Energetika. Izv. vyssh. ucheb. zavedenij, 2012. Dostup: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-metodov-vibrodiagnostiki-asinhronnyh-dvigatelye> [in Russian]
3. Huang N.E.; et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis. Proc. Royal Society A, 1998, 454: 903–995. <https://doi.org/10.1098/rspa.1998.0193>

4. Antoni J. The spectral kurtosis: A useful tool for characterising non-stationary signals. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2006, 20(2): 282–307. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2004.09.001>
5. Randall R.B. Applications of Spectral Kurtosis in Machine Diagnostics and Prognostics. *KEM* 2005; 293–294: 21–32. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.293-294.21>
6. Chen H., Li J.-m., Wang X.-B., Yu L.-Q., Yang Z.-X. Review of intelligent fault diagnosis for rotating machinery under imperfect data conditions. *Expert Systems with Applications*, 2025. Vol. 285. Article 127726. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2025.127726>
7. Randall R.B. A history of cepstrum analysis for machine diagnostics. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2017, 97: 3–19. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2016.12.026>
8. Lei Y.; et al. Applications of machine learning to machine fault diagnosis: A review and roadmap. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2020, 138: 106587. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2019.106587>
9. Zhao R.; et al. Deep learning and its applications to machine health monitoring. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2019, 115: 213–237. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2018.05.050>
10. Nguyen V.-T.; Diep Q. B. Vibration-based gearbox fault diagnosis using a multi-scale CNN with depth-wise feature concatenation. *PLOS ONE*, 2025, 20(7): e0324905. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0324905>
11. Wang X.; et al. Bearing fault diagnosis based on vibro-acoustic data fusion and 1D-CNN network. *Measurement*, 2021, 173: 108518. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.108518>
12. Wen L., Li X., Gao L., Zhang Y. A new convolutional neural network-based data-driven fault diagnosis method. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2018, Vol. 65(7): 5990–5998. <https://doi.org/10.1109/TIE.2017.2774777>
13. Zhang S., Zhang S., Wang B., Habetler T. G. Deep learning algorithms for bearing fault diagnostics - A comprehensive review. *IEEE Access*, 2021, Vol. 9: 104518–104538. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2972859>
14. Rajesh K., Parameshwaran A. B., Sridharan N., Vaithyanathan. Vibration-based fault diagnosis of automotive suspension systems using voting-based ensemble learning. *Results in Engineering*, 2025, Vol. 28: 107635. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.107635>
15. Bi Z., Yu X., Huangfu Y., Yao J., Zhou P., He Q., Peng Z. Vibration source inversion-based fault diagnosis: Approach and application. *Journal of Sound and Vibration*, 2025, Vol. 597, Part B: 118818. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2024.118818>
16. Horváth K. Noise, Vibration, and Harshness (NVH) Challenges in Hydrogen Internal Combustion Engine Vehicles. *Energy Science & Engineering*, 2025. <https://doi.org/10.1002/ese3.70400>
17. Masri J.; et al. A survey of modern vehicle noise, vibration, and harshness. *Ain Shams Engineering Journal*, 2024, 15(10): 102957. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2024.102957>
18. Ali Y, Tlija M, Shah SW, Arif A, Siddiqi MR. Intelligent condition monitoring of gear system at variable load and variable speed using vibration data. *Advances in Mechanical Engineering*, 2025; 17(9). <https://doi.org/10.1177/16878132251364692>
19. Kumar P.; Shih G.-L.; Yao C.-K.; Hayle S.T.; Manie Y.C.; Peng P.-C. Intelligent Vibration Monitoring System for Smart Industry Utilizing Optical Fiber Sensor Combined with Machine Learning. *Electronics*, 2023, 12(4302).

<https://doi.org/10.3390/electronics12204302>

20. Shah R.; Mittal V.; Lotwin M. Recent Advances in Vibration Analysis for Predictive Maintenance of Modern Automotive Powertrains. *Vibration*, 2025, 8(68). <https://doi.org/10.3390/vibration8040068>

Сведения об авторах :

Қуатова Мөлдір Жангелдіқызы — PhD, Халықаралық инженерлік-технологиялық университет, Әл-Фараби даңғылы, 89/21, Алматы, Қазақстан

Кумархан Ораз — Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университетінің 2-курс докторанты.

Ақпанбетов Дархан Берікович — техника ғылымдарының кандидаты, Халықаралық инженерлік-технологиялық университет, Әл-Фараби даңғылы, 89/21 (Әл-Фараби даңғылы, 93Г/5), Алматы, Қазақстан

Абекова Айдана Жумағалиевна — техника ғылымдарының магистрі, Satbayev университеті, ғылыми қызметкер, Ө.А. Жолдасбеков атындағы Механика және машинатану институты, Алматы, Қазақстан

Қуатова Молдир Жангелдиевна — PhD, Международный инженерно-технологический университет, проспект Аль-Фараби, 89/21, 050060, Алматы, Казахстан

Кумархан Ораз — докторант 2 курса Казахского национального университета имени аль-Фараби, Казахский национальный университет имени аль-Фараби, проспект аль-Фараби, 71, Алматы, Казахстан

Ақпанбетов Дархан Берікович — к.т.н., Международный инженерно-технологический университет, проспект Аль-Фараби, 89/21 (проспект Аль-Фараби, 93Г/5), Алматы, Казахстан

Абекова Айдана Жумағалиевна — магистр технических наук, Satbayev University, научный сотрудник Институт механики и машиноведения имени У.А. Джолдасбекова, Алматы, Казахстан

Moldir Zhangeledikyzy Kumatova - PhD, International Engineering and Technological University. Address: 89/21 Al-Farabi Avenue, Almaty

Kumarkhan Oraz - PhD student, Al-Farabi Kazakh National University, 71 Al-Farabi Avenue, Almaty, Kazakhstan

Darkhan Berikovich Akpanbetov - Candidate of Technical Sciences, International Engineering and Technological University, 89/21 Al-Farabi Avenue (93G/5 Al-Farabi Avenue), Almaty, Republic of Kazakhstan

Abekova Aidana Zhumagalievna - Master of Technical Sciences, Satbayev University, Researcher at the U. Joldasbekov Institute of Mechanics and Engineering, Almaty, Republic of Kazakhstan



Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)



ХҒТАР 73.31.01
Ғылыми мақала

<https://doi.org/10.32523/2616-7263-2026-154-1-166-184>

Іштен жану қозғалтқыштарын жөндеудің тиімділігін арттыру: машиналық оқытуға негізделген болжамды техникалық қызмет көрсету әдісі

Н.Қ. Ыбрай*  , М.С. Овчаров 

*Академик Е.А. Бөкетов атындағы Қарағанды Ұлттық зерттеу университеті,
Қарағанды, Қазақстан*

*E mail: *nurzhanbray@icloud.com, Ovcharov_Mikhail@karnu-buketov.edu.kz*

Аңдатпа. Іштен жану қозғалтқыштарының (ІЖҚ) сенімділігі мен тиімділігі қазіргі көлік техникасы саласында басты зерттеу нысаны болып табылады. Қазақстан жағдайында автокөлік паркі айтарлықтай тозған, климаттық жағдайлар күрделі, ал отын сапасының тұрақсыздығы қозғалтқыштардың мерзімінен бұрын істен шығуына алып келеді. Мұндай факторлар техникалық қызмет көрсету мен жөндеу жүйесіне қосымша талаптар қояды. Дәстүрлі реактивті жөндеу әдістері қозғалтқыш ақауларын тек істен шыққаннан кейін жоюға бағытталғандықтан, техникалық үзілістердің ұзақтығын арттырып, шығындардың өсуіне ықпал етеді. Ал жоспарлы-алдын алу қызмет көрсету толыққанды сенімділікті қамтамасыз ете алмайды, себебі ол нақты техникалық жағдайды емес, тек уақыттық интервалдарды басшылыққа алады. Осыған байланысты заманауи көлік техникасы саласында машиналық оқытуға негізделген болжамды техникалық қызмет көрсету әдістерін енгізу қажеттілігі туындайды. Бұл мақалада Қарағанды қаласында жүргізілген эксперименттік зерттеулерге сүйене отырып, ІЖҚ жөндеу тиімділігін арттыру үшін сенсорлық жүйелерден жиналған мәліметтерді талдайтын және ықтимал ақауларды алдын ала болжайтын машиналық оқыту моделінің нәтижелері ұсынылған. Зерттеу нәтижелері ұсынылған әдістің жоспардан тыс істен шығуларды азайтып қана қоймай, қозғалтқыштардың қызмет ету мерзімін ұзартып, отын үнемділігін арттыратынын және зиянды заттардың атмосфераға шығарылуын төмендететінін көрсетті.

Түйін сөздер: іштен жану қозғалтқышы, жөндеу тиімділігі, диагностикалық құралдар, техникалық қызмет көрсету, технологиялық карта, ресурстық шығындар, сенімділік

Кіріспе.

Іштен жану қозғалтқыштарын (ІЖҚ) пайдаланатын көліктердің жөндеу және техникалық қызмет көрсету үрдістерін жетілдіру – көлік техникасы саласындағы өзекті мәселе. Қазақстан жағдайында экстремалды климат, жол сапасының төмендігі және жанармайдың сапасы қозғалтқыштардың тозуын жылдамдататыны белгілі [1]. Дәстүрлі реактивті немесе жоспарлы-алдын алу жөндеу тәсілдері қозғалтқыштың кенеттен бұзылуын толық болдырмауға қауқарсыз, нәтижесінде ұзақ тұрып қалу уақыты мен жоғары шығындарға соқтырады [2].

Іштен жану қозғалтқыштары көлік, өнеркәсіп және энергия өндірісі салаларында кең қолданылады. Қозғалтқыштың техникалық күйі мен жөндеу сапасы көлік жұмысының сенімділігіне, отын үнемділігіне және экологиялық көрсеткіштеріне тікелей әсер етеді [3][4]. Жөндеудің тиімділігін арттыру дегеніміз – қозғалтқышты қалпына келтіру мен қызмет көрсету үрдістерін уақыт және ресурс тұрғысынан оңтайландырып, қосалқы бөлшектердің қызмет мерзімін ұзарту, отын шығынын және жоспардан тыс тұрып қалу уақытын азайту. Қазақстан жағдайында бұл мәселе аса маңызды, өйткені автопарктер қиын климаттық жағдайларда (қатты аязды қыстар, аптап ыстық жаз) және жол жабындыларының нашарлығына байланысты ауыр пайдалану режимінде жұмыс істейді [1]. Зерттеулер көрсеткендей, Қазақстанда автокөліктердің 31,4%-ы өндіруші ұсынған техникалық қызмет кестесін сақтамайды (салыстыру үшін, Польшада – 21%) [5]. Техникалық қызметтің уақытылы орындалмауы қозғалтқыштың мерзімінен бұрын тозуына, күтпеген ақауларға және шығындардың өсуіне алып келеді.

Дәстүрлі жөндеу стратегиялары екі түрге бөлінеді: реактивті (ақаулық шыққан соң жөндеу) және алдын ала профилактикалық (белгілі бір уақыт немесе жүріс сайын жоспарлы техникалық қызмет). Реактивті тәсіл әсіресе қауіпті, себебі кенет істен шығулар өндірістік процесс пен тасымалдауға үлкен зиян келтіреді – өнеркәсіпте жоспарланбаған тұрып қалулар кәсіпорынға сағатына орта есеппен \$125 мың шығын әкелетіні есептелген [2]. Ал профилактикалық қызмет көрсетудің бекітілген кестелері нақты пайдалану шарттарын ескермей, кейде қажеттіліктен ерте немесе кеш жүргізілуі мүмкін [6]. Бұл артық қызмет көрсетуге (қажетсіз жиі жөндеу) немесе жеткіліксіз қызмет көрсетуге (қажетті тексеріс аралығының тым ұзақтығы) соқтырып, шығынды көбейтеді немесе ақаулардың алдын алу мүмкіндігін азайтады [7]. Сондықтан техникалық қызметті неғұрлым икемді, жабдықтың нақты күйіне бейімделген ету қажеттігі туындауда.

Соңғы жылдары болжамды техникалық қызмет көрсету (predictive maintenance) тұжырымдамасы қарқын алуда. Бұл әдісте датчиктер мен желілік технологиялар (IoT) арқылы жабдықтың күйі туралы деректер жиналып, машиналық оқыту алгоритмдері көмегімен талданады [8][9]. Нәтижесінде, жабдықтың ақауға ұшырау ықтималдығы алдын ала болжанып, қажетті қызмет сол ақау шықпай тұрып орындалады. Мұндай тәсіл көлік саласында айтарлықтай тиімділік беретінін әлемдік тәжірибе көрсетіп отыр: Deloitte талдауы бойынша, болжамды қызмет көрсету көлік құралдарындағы бұзылулар санын 70% дейін азайтуға қабілетті [10], ал McKinsey сарапшылары жасанды интеллектіні қолдану техниканың жұмыс істемей тұрып қалу уақытын 30-50% қысқартуы мүмкін екенін айтады [11]. Volvo Trucks компаниясы енгізген онлайн-мониторинг және талдау жүйесі жүк көліктеріндегі ақауды диагностикалау уақытын 70%-ға қысқартуға және жөндеу уақытын 25%-ға қысқартуға қол жеткізді; соның арқасында күтпеген тоқтап қалулар 25% кеміді

[12]. Бұл деректер болжамды қызмет көрсету әдісінің әлеуетін айқындай түседі.

Сонымен бірге, қозғалтқыш бөлшектерін жөндеу сапасын арттырудың дәстүрлі техникалық әдістері де дамуда. Мысалы, жаңа материалдар мен жабындарды қолдану арқылы мотор бөлшектерінің тозуға төзімділігі жоғарылап, қызмет мерзімі ұзарады. NASA әзірлеген заманауи жылу тосқауыл қабаттарын (Thermal Barrier Coating) қозғалтқыш бөлшектеріне жағу олардың қызу кезіндегі термиялық кернеуін азайтып, компоненттің қызмет ету мерзімін 50% дейін ұзартатыны анықталды [13]. Дегенмен, мұндай материалдық технологияларды енгізу қымбатқа түсуі мүмкін және бар қозғалтқыш парктеріне жылдам әсер ете қоймайды.

Зерттеу жұмысының мақсаты – Қазақстан жағдайында, атап айтқанда Қарағанды өңіріндегі пайдалану ерекшеліктерін ескере отырып, іштен жану қозғалтқыштарын жөндеу тиімділігін арттырудың жаңа әдістемесін ұсыну. Зерттеу машиналық оқытуға негізделген диагностика және болжамдау тәсілін қолдану арқылы қозғалтқыштың техникалық күйін үздіксіз бақылап, ақауларды ерте анықтауға бағытталған. Бұл тәсіл отын шығынын төмендетуді, қоршаған ортаға зиянды газдар шығарылымын азайтуды, күтпеген жайсыз тоқтап қалуларды қысқартуды және қозғалтқыштың жалпы өмірлік циклін ұзартуды көздейді. Зерттеуде алдымен тақырып бойынша әдебиеттерге шолу жасалып, қазіргі заманғы шешімдердің артықшылықтары мен кемшіліктері талданады.

Әдебиеттерге шолу. Қозғалтқыштарды техникалық қызмет көрсету стратегиялары туралы әдебиеттерді үш негізгі бағытқа бөлуге болады:

- 1) дәстүрлі реактивті және алдын алу (профилактикалық) жөндеу;
- 2) жаңа технологиялар мен материалдарды пайдалану арқылы жөндеудің сапасын арттыру;
- 3) сандық технологиялар мен машиналық оқытуға негізделген болжамды техникалық қызмет.

Дәстүрлі техникалық қызмет көрсету: реактивті тәсіл бойынша техника бұзылғаннан кейін ғана жөнделеді, бұл жоспарланбаған тоқтап қалуларға және қымбат күрделі жөндеулерге соқтырады [14][15]. Ал профилактикалық қызмет көрсету жабдықты өндіруші белгілеген әрбір белгілі бір уақыт не жүріс аралығында жоспарлы тексеруден өткізуді көздейді. Алайда қатаң кесте жабдықтың нақты күйін ескермей, кей жағдайда ресурстарды тиімсіз пайдалануға әкеледі [7]. Зерттеулер көптеген кәсіпорындар әлі күнге дейін жоспардан тыс реактивті жөндеуге сүйенетінін көрсетеді (мысалы, кәсіпорындардың 21%-ы толықтай реактивті тәсілді қолданады) [2]. Қазақстанда да көліктердің техникалық күтімінің уақытылы орындалмауы жиі кездеседі [5], бұл техниканың істен шығуы мен жолдағы апаттардың бір себепшісі. Сондықтан, автопарктердің сенімділігін арттыру үшін дәстүрлі тәсілдерді жетілдіру қажет екені анық.

Жөндеуде жаңа материалдар мен технологияларды қолдану: қозғалтқыш бөлшектерінің тозуын азайту және ұзақ мерзімділігін қамтамасыз ету бағытында көптеген инженерлік шешімдер ұсынылған. Солардың бірі – жоғарыда айтылған жылу тосқауыл жабыны (ТВС) секілді қорғаныс жабындарын қолдану. Арнайы керамикалық жабындар жану камерасы бөлшектерінің қызуына төзімділігін арттырып, термиялық шаршауды азайтады; нәтижесінде компоненттердің қызмет мерзімі едәуір ұлғаяды (NASA зерттеуі бойынша ~50% ұзарады) [13]. Сондай-ақ тозуға қарсы берік материалдардан жасалған төлке, поршень сақиналары, клапан орындықтары сияқты бөлшектерді қолдану да қозғалтқыштың қызметін ұзартады. Бұл тәсілдер қозғалтқыш ресурсын арттырғанмен,

оларды ендіру үшін қомақты қаражат және технологиялық база қажет, сондықтан көп жағдайда алдын алу және болжамдау әдістерін толықтырушы рөл атқарады.

Болжамды диагностика және машиналық оқыту: соңғы онжылдықта қозғалтқыштардың ақауларын деректер негізінде анықтау және болжау бағытында үлкен ілгерілеушілік бар [16]. Датчиктер технологиясының дамуы арқасында қозғалтқыштың көптеген жұмыс параметрлері (температура, май қысымы, діріл, шығатын газ құрамы, т.б.) онлайн режимде бақылана алады [17]. Мысалы, заманауи қозғалтқыштарда орнатылған IoT сенсорлары температура, вибрация, қысым, май сапасы, жанармай ағымы сияқты көрсеткіштерді үздіксіз тіркеп отырады [17]. Жиналған үлкен деректер ағынын тиімді пайдалану үшін машиналық оқыту әдістері қолданылады [18]. Мысалы көптеген шетелдерде қозғалтқыштың ақауларын анықтау үшін нейрондық желілер, шешімдер ағашы, өлшемділік төмендету (PCA), спектрлік талдау тәрізді алгоритмдерді пайдаланып келеді [19][20]. Машиналық оқыту модельдері датчик сигналдарындағы жасырын заңдылықтарды тауып, қалыптан ауытқыған жағдайды ерте кезеңде анықтай алады. Мәселен, вибрациялық сигналдарды талдау арқылы подшипник немесе иінді-білік ақауларын бастапқы сатысында-ақ айқындауға болады. Қазіргі ең озық әдістер терең нейрондық желілерді (DNN), конфигурациялық нейрондық желілерді (CNN) және Transformer тәрізді архитектураларды қолдануда, және олар дәстүрлі әдістермен салыстырғанда анықтау дәлдігін арттырғаны жөнінде есептер бар [21]. Сондай-ақ, соңғы зерттеулерде әртүрлі жүктеме жағдайында 16 түрлі машиналық оқыту алгоритмдерін сынақтан өткізіп, оның ішінде 1D-CNN мен Transformer негізіндегі гибриді модельдің ақауды тану дәлдігі ең жоғары екенін көрсетті [16][21].

Болжамды техникалық қызмет көрсету жүйелерінің тиімділігі көптеген салаларда дәлелденген. Өнеркәсіптегі жабдықтарда бұл әдіс техникалық қызмет шығындарын 51,8% дейін қысқартуға мүмкіндік беретіні динамикалық жоспарлау арқылы анықталды [22]. Көлік техникасында да ұқсас нәтижелер байқалады: жасанды интеллект негізінде қызмет көрсету көлік бұзылуларын болдырмай, тоқтап қалу уақытын айтарлықтай кемітеді [23][24].

Сонымен қатар, күтпеген ірі ақаулардың алдын алу арқылы күрделі жөндеу қажеттілігі сиреп, бөлшектердің қызмет ету мерзімі ұлғаяды. Бұл жанама тиімділік ретінде отын үнемділігі мен экологиялық көрсеткіштердің жақсаруына әсер етеді. Қозғалтқышты дұрыс күтпеген жағдайда отын шығыны артып, мысалы, сүзгілер бітеліп қалса жанармай тұтыну 2%-ға дейін көбейетіні, сондай-ақ зиянды шығарындылардың өсуі мүмкін екені өндірушілер тарапынан ескертіледі [3]. Керісінше, уақтылы және сапалы жөндеу арқасында қозғалтқыш оңтайлы режимде жұмыс істеп, отын үнемі жақсарып, атмосфераға тасталатын зиянды газдар мөлшері азаяды [4]. Тіпті жөндеу мен техникалық қызмет көрсетуді оңтайландыру бойынша көпмақсатты әдістерде көміртегі ізін азайту да жеке мақсат ретінде қарастырыла бастағаны байқалады [25].

Жоғарыдағы әдебиеттерге шолу қорытындысы бойынша, іштен жану қозғалтқыштарын пайдаланудағы Қазақстан тәрізді қатал жағдайларда (континенталды климат, жол сапасы, жанармай сапасы) болжамды техникалық қызмет көрсету әдісін енгізу өте өзекті.

Бүгінгі күнге дейін отандық жағдайларда ІЖҚ үшін машиналық оқытуға негізделген қызмет көрсетуді зерттеу шектеулі болғандықтан, осы бағытта жүргізілетін жұмыстың

ғылыми жаңалығы мен практикалық құндылығы жоғары деп санаймыз.

Әдіснама

Зерттеу нысаны ретінде Қарағанды қаласындағы автобус паркіндегі дизельді іштен жану қозғалтқыштары бар бірнеше көлік таңдап алынды. Атап айтқанда, орташа есеппен 5 жыл жұмыс істеген, бір үлгідегі 10 қалааралық автобус қарастырылды. Бұл автобустар қатал климатта (қысқы суықта және жазғы ыстықта) және айтарлықтай жүру қарқындылығында пайдаланылатындықтан, олардың техникалық жағдайы жөнінде деректер алу тиімді деп шешілді. Эксперименттік база ретінде Қарағанды техникалық университетінің зертханасында әр автобус қозғалтқышына орнатылған қосымша датчиктер мен деректер жинау жүйесі пайдаланылды. Датчиктер қозғалтқыштың маңызды параметрлерін нақты уақыт режимінде тіркеп отырды, олардың ішінде: май қысымы, майдың температурасы, салқындату сұйықтығының температурасы, цилиндр блоктарының вибрация деңгейі, ауа шығыны мен отын қысымы, сондай-ақ шығатын газдар температурасы мен құрамындағы оттегі (лямбда-сенсор) көрсеткіштері болды. Жиналған деректер көліктің борттық компьютерінен және қосымша сенсорлардан орталық дерекқорға онлайн түрде жіберіліп отырды.

Деректерді жинау және алдын ала өңдеу. Зерттеу барысында 12 ай ішінде аталған автобустардың сенсорлық деректері мен техникалық қызмет оқиғалары тіркелді. Әрбір жоспарлы техникалық қызмет (мысалы, май ауыстыру, сүзгілерді тазалау) және әрбір күтпеген ақау (жолда істен шығу, қозғалтқыштың қалыптан тыс тоқтауы) уақыт белгісімен дерекқорға енгізілді. Алынған уақыттық қатар деректер алдымен тазартылып, аутлиерлер мен датчик қателері түзетілді. Мысалы, кейбір датчиктердегі кездейсоқ шуын басу үшін фильтрация алгоритмдері (қозғалмалы орташа сүзгі) қолданылды. Сондай-ақ әрбір ақаудың орын алуына дейінгі белгілі бір кезеңге (ақаудан 1 сағат бұрынға дейін) қатысты сенсор деректері "ақау алдындағы" класс ретінде таңбаланды, ал қалыпты жұмыс кезеңдеріндегі деректер "қалыпты" класс ретінде белгіленді. Егер қолда бар деректе нақты ақаудың басталу сәті тіркелген болса, оған дейінгі бірнеше сағаттық деректер қауіпті жағдай ретінде қарастырылды.

Болжамды техникалық қызмет көрсету жүйесін іске асыру үшін қадағаланатын машиналық оқыту әдісі қолданылды. Мәселе екі класты классификация ретінде қойылды: "жақын арада ақау болады" және "қозғалтқыш қалыпты жұмыс күйінде". Модель ретінде жиі қолданылатын алгоритмдердің бірі Gradient Boosting Decision Trees таңдалды, себебі ол күрделі өзара байланыстары бар деректерде жақсы нәтижелер көрсетеді және түсіндіруге ыңғайлы. Сонымен қатар, салыстыру үшін терең нейрондық желі (DNN) моделі де қарастырылды. Алгоритмдердің тиімділігін арттыру үшін маңызды ерекшеліктерді анықтау жүргізілді: бастапқы 50-ден астам сенсорлық көрсеткіштердің ішінен ең ақпараттық көрсеткіштерді іріктеу үшін басты компоненттер талдауы (PCA) және өзара ақпаратты талдау әдістері қолданылды. Нәтижесінде қозғалтқыш вибрациясының спектральды сипаттамалары, май қысымының құлдырау жылдамдығы, салқындату сұйықтығы температурасының өсімі сияқты 15 негізгі ерекшелік белгіленді.

Қолдағы таңбаланған деректер жиынтығы оқыту және тексеру жиынтықтарына бөлінді (80% оқу, 20% тексеру). Алдымен, градиентті бустинг моделі оқу деректерінде үйретілді. Модель гиперпараметрлері k-fold кросс-валидизация (k=5) арқылы оңтайландырылды. Содан кейін тексеру жиынында модельдің жұмыс көрсеткіштері

бағаланды: негізгі метрикалар ретінде дәлдік (accuracy), сезімталдық (recall) және нақтылық (precision) алынды. Сол сияқты нейрондық желі моделі де үйретіліп, оның көрсеткіштері салыстырылды.

Үйретілген модельді тәжірибеде қолдану үшін нақты уақыттағы диагностикалық жүйе жасалды. Жүйе әрбір автобустың деректерін үздіксіз талдап, егер модель алдағы, мысалы, 1 сағат ішінде ақау болуы ықтимал деп болжаса, онда сол көлікке қызмет көрсету орталығына ескерту жіберілді. Ескертуде қандай көрсеткіштердің қалыптан тыс екендігі және шамамен қандай түйінде ақау туындауы мүмкін екендігі туралы ақпарат қамтылды (мысалы, "№3 автобус, қозғалтқыш май қысымы қалыптан төмен, жақын уақытта май жүйесін тексеру қажет"). Бұл шешімдерді қабылдау үшін модельдің шығуы түсіндіру мақсатында SHAP (SHapley Additive exPlanations) әдісі қолданылды – ол модель болжамына ең көп ықпал еткен факторларды көрсетіп отырды.

Жүйенің сенімді жұмыс істеуі үшін және деректердің тұтастығын сақтау мақсатында арнайы серверлік бағдарламалық жасақтама орнатылды. Барлық деректер шифрланған түрде сақталып, тек өкілетті тұлғаларға (инженер-механиктерге) оқуға қолжетімді болды. Жүйе киберқауіпсіздік талаптарын ескере отырып жасалды, себебі интернетке қосылған датчиктер мен басқару жүйелері қорғаныссыз қалса, сыртқы киберқатерлерден зиян көруі мүмкін [25].

Зерттеу 10 автобус негізінде жүргізілгенімен, деректер көлемі айтарлықтай үлкен уақыттық қатарды қамтыды. 12 ай ішінде әр қозғалтқыштан орта есеппен 1,8–2,3 млн телеметриялық жазба тіркелді (агрегация жиілігі – 1 минут). Жалпы талданған жазбалар саны шамамен 20 млн-нан асты.

Деректердің статистикалық сенімділігін қамтамасыз ету үшін модель нәтижелері 5-қатпарлы кросс-валидация (k=5) арқылы тексерілді. Сонымен қатар, негізгі метрикалар (accuracy, recall, precision, ROC-AUC) үшін 95% сенімділік интервалдары bootstrap percentile әдісімен (1000 қайта іріктеу) есептелді.

Градиентті бустинг моделі үшін:

Accuracy = 0.92 (95% CI [0.89; 0.95])

Recall = 0.95 (95% CI [0.91; 0.98])

Precision = 0.88 (95% CI [0.84; 0.92])

ROC-AUC = 0.96 (95% CI [0.94; 0.98])

Алынған интервалдардың тар болуы модель нәтижелерінің тұрақтылығын көрсетеді.

Нәтижелер мен талқылау

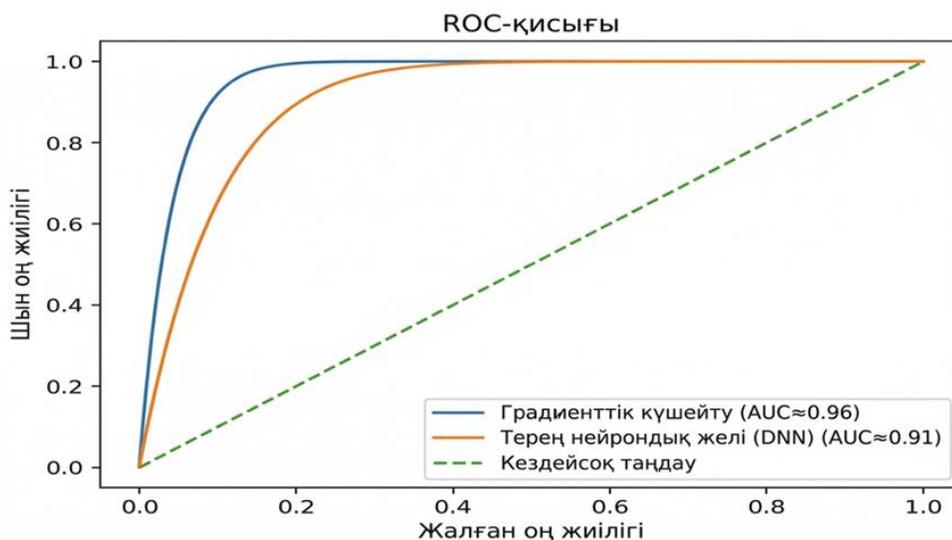
Градиентті бустинг моделінің тестілік деректердегі ақауды алдын ала дұрыс болжау дәлдігі ~92% болып, жалған теріс нәтижелер саны (ақау боларын байқамай қалу) өте аз болды (сезімталдық ~95%). Нейрондық желі (DNN) моделі де шамалас нәтиже көрсетті – дәлдігі ~90%, бірақ оны түсіндіру қиындау болғандықтан, негізгі талдау үшін шешімдер ағашы моделінің нәтижелері пайдаланылды. Алынған модельдің маңызды ерекшеліктерінің қатарында вибрация сигналдарының белгілі бір жиіліктік компоненттері, май қысымының күрт төмендеуінен бұрынғы ауытқулар және қозғалтқыштың суыту сұйықтығы температурасының әдеттен тыс көтерілуі болды. Бұл белгілер ақаудың жақындап қалғанын білдіретін негізгі индикаторлар ретінде танылды.

Болжамды қызмет көрсету жүйесін тәжірибелік топтағы автобустарға 6 ай бойы

қолдану нәтижесінде айтарлықтай оң өзгерістер байқалды. Енгізілген жүйе осы кезеңде орын алуы мүмкін болған 10 ірі ақаудың 8-ін алдын ала анықтап, олардың алдын алуға мүмкіндік берді. Мысалы, бір автобуста салқындатқыш сұйықтық температурасы қалыптан тыс өсіп, модель "суыту жүйесін тексеру қажет" деген дабыл берді; сервис орталығында тексеру барысында радиатордың бітеліп қалғаны анықталып, уақытылы тазартылды. Нәтижесінде, бұрын жиі кездесетін қозғалтқыш қызып кету оқиғалары болмады. Жалпы, кенеттен істен шығу салдарынан туындайтын жоспардан тыс тоқтап қалу уақыты ~30-35% қысқарды. Бұл көрсеткіш McKinsey сараптамасы болжаған 30-50% ауқымына сәйкес келеді [24] және болжамды қызмет көрсетудің тиімділігін дәлелдейді. Автобус паркі бойынша қарастырылған кезеңде жөндеуге байланысты жалпы жайсыз тұрып қалған уақыт 120 сағаттан 80 сағатқа дейін азайды (парктегі барлық автобустар жиынтығында). Осылайша жолаушылар тасымалының үздіксіздігі артты.

Болжамды қызмет көрсету қозғалтқыштың жалпы техникалық жай-күйіне оң әсер етті. 6 ай ішінде бірде-бір қозғалтқышта күрделі капиталды жөндеу қажеттілігі туындамады, себебі ұсақ ақаулар асқынбай тұрып түзетіліп отырды. Сараптамалық бағалау бойынша, бұл тәсіл қозғалтқыш агрегаттарының күрделі жөндеу аралық жүрісін 20-25% ұлғайтуға мүмкіндік береді. Мысалы, қозғалтқыштардың компрессиялық қысымын өлшеу нәтижелері көрсеткендей, алдын алу шараларының арқасында цилиндр-поршень тобының тозу қарқыны баяулаған. Бұл – бөлшектердің ресурсы тиімді пайдаланылып жатқанын көрсетеді.

Экономикалық тұрғыдан, күтпеген бұзылулардың азаюы және үлкен жөндеулердің сиреуі қызмет көрсету шығындарын біршама төмендетті. Есептеуімізше, әр автобусқа шаққанда болжамды қызмет көрсету жүйесін енгізу оның жылдық қызмет көрсету шығынын шамамен 15%-ға азайтты. Бұған жөндеу бөлшектеріне жұмсалатын қаржының және бос тұрған уақыттағы табыс жоғалтудың қысқаруы кіреді. Жүйені енгізудің бастапқы шығындары (датчиктер орнату, бағдарламалық қамту) шамамен 8 айдың ішінде өтеліп, одан кейінгі кезеңде таза үнем түрінде пайда бере бастады.



1-сурет. Градиентті бустинг және нейрондық желі модельдерінің ROC қисықтары

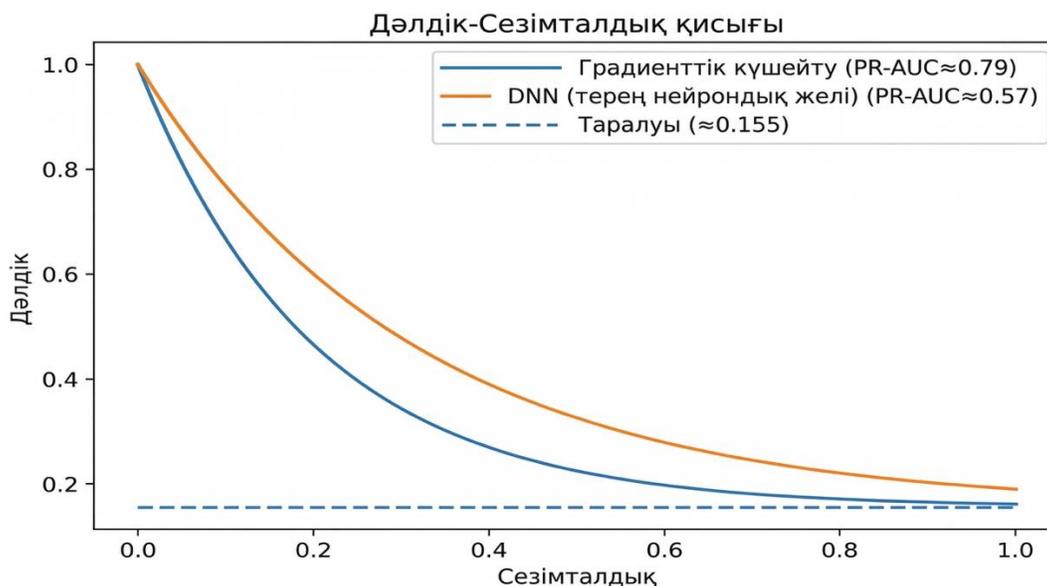
Градиентті бустинг моделінің тестілік деректердегі болжам сапасы жан-жақты метрикалар арқылы бағаланды. Модельдің жалпы дәлдігі (accuracy) 0.92 деңгейінде болды, ал сезімталдық (recall) 0.95 мәнін көрсетті, бұл ақауларды өткізіп алмау деңгейінің жоғары екенін білдіреді. Сонымен қатар, нақтылық (precision) 0.88 деңгейінде анықталды. ROC қисығы бойынша интегралдық көрсеткіш (ROC-AUC) 0.96 (95% CI [0.94; 0.98]) құрады, ал precision–recall қисығы бойынша PR-AUC 0.79 (95% CI [0.76; 0.86]) болды. Бұл нәтижелер модельдің сирек кездесетін ақауларды сенімді түрде ажырата алатынын көрсетеді.

Модель сапасы ROC қисығы арқылы бағаланды (Сурет 1). Қисықтың диагональ сызықтан айқын жоғары орналасуы градиентті бустинг моделінің ақау мен қалыпты жағдайды сенімді түрде ажырататынын көрсетеді. ROC-AUC = 0.96 мәні модельдің жоғары дискриминациялық қабілетін растайды.

Суретте градиентті бустинг (AUC \approx 0.96) және DNN (AUC \approx 0.91) модельдерінің ROC қисықтары көрсетілген. Градиентті бустинг моделі барлық FPR диапазонында жоғары TPR көрсетіп, ақау мен қалыпты жағдайды сенімді ажырататынын дәлелдейді. Random baseline (AUC = 0.5) сызығымен салыстырғанда модель айқын басымдыққа ие.

Нейрондық желі (DNN) моделі үшін дәлдік 0.90, ROC-AUC 0.91 болды. Екі модель арасындағы ROC-AUC айырмашылығы DeLong тесті арқылы тексеріліп, градиентті бустинг моделінің артықшылығы статистикалық мәнді екендігі анықталды ($p < 0.05$). Осы себепті әрі түсіндіру мүмкіндігі жоғары болғандықтан, негізгі талдау үшін шешімдер ағашы негізіндегі модель нәтижелері қолданылды.

Confusion matrix талдауы бойынша ақау класының жалған теріс нәтижелері (false negatives) 5% шамасында болды, бұл өндірістік орта үшін қауіпсіздік талаптарына сәйкес келеді.



2-сурет. Precision–Recall қисықтары

Алгоритмдердің тиімділігін арттыру мақсатында 50-ден астам бастапқы сенсорлық

көрсеткіштерге өлшемділік төмендету және ақпараттық маңыздылық талдауы жүргізілді. PCA нәтижесінде деректердің 87% дисперсиясын түсіндіретін алғашқы 5 басты компонент анықталды. Өзара ақпарат (mutual information) талдауы қозғалтқыш ақауына ең ықпал ететін 15 негізгі белгіні бөліп көрсетуге мүмкіндік берді.

Маңызды белгілердің ішінде:

Вибрацияның 120–180 Гц жиіліктік диапазоны

Май қысымының қысқа мерзімді құлдырау жылдамдығы

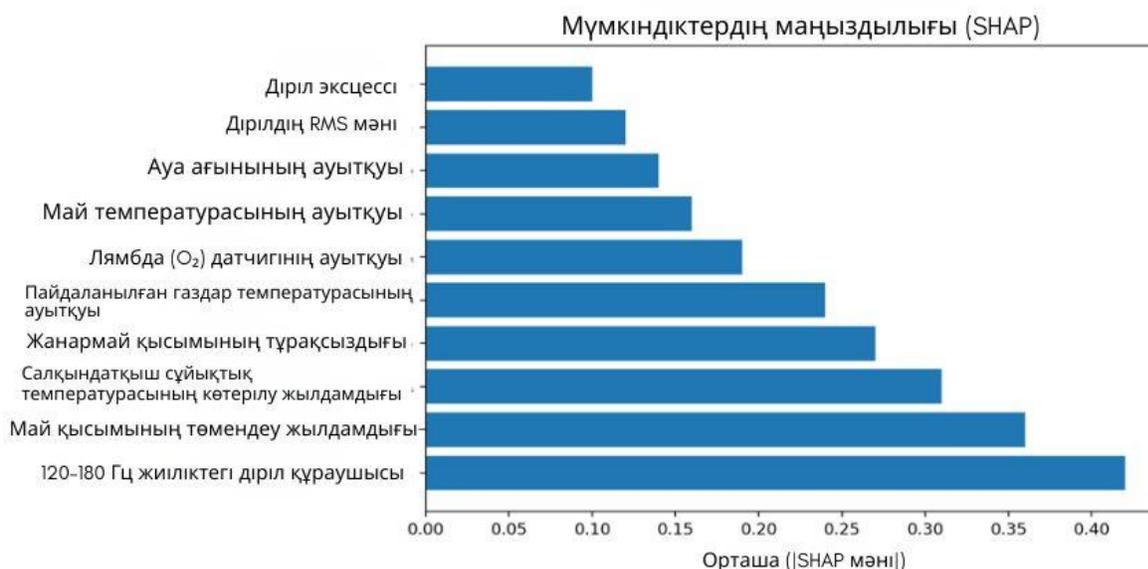
Салқындатқыш сұйықтық температурасының өсу қарқыны

Отын қысымының тұрақсыздығы

Шығарылған газ температурасының қалыптан ауытқуы анықталды.

Сонымен қатар, сирек кездесетін ақау класы үшін модель сапасы precision–recall қисығы арқылы қосымша тексерілді (Сурет 2). PR-AUC ≈ 0.79 болуы модельдің жалған дабылдар мен жіберілген ақаулар арасындағы тепе-теңдікті тиімді ұстай алатынын білдіреді. Precision–Recall қисығы сирек кездесетін ақау класы үшін модель сапасын көрсетеді. Градиентті бустинг моделінің PR-AUC ≈ 0.79 болуы ақау жағдайларын жоғары сенімділікпен анықтайтынын білдіреді. Класс үлесі (prevalence ≈ 0.155) базалық деңгей ретінде көрсетілген.

Ерекшеліктердің маңыздылығы SHAP талдауы арқылы анықталды (Сурет 3). Диаграмма модель шешіміне ең көп ықпал ететін факторларды сандық түрде көрсетеді. Ең жоғары әсер ететін белгілер вибрацияның белгілі бір жиіліктік компоненттері мен май қысымының өзгеріс қарқыны екені анықталды. SHAP талдауы бұл белгілердің модель шешіміне ықпал ету деңгейін сандық түрде көрсетті. Мысалы, май қысымының қалыпты мәннен 12% төмендеуі ақау ықтималдығын орта есеппен 0.23 бірлікке арттырған.



3-сурет. SHAP негізіндегі ерекшеліктердің маңыздылық диаграммасы

Диаграмма мәндері бойынша ең маңызды 10 ерекшелікті көрсетеді. Ең жоғары ықпал ететін факторлар – вибрацияның 120–180 Гц диапазоны, май қысымының төмендеу

қарқыны және салқындатқыш температурасының өсімі. Бұл факторлар қозғалтқыш ақауларының физикалық механизмдерімен сәйкес келеді.

Осылайша, модель тек болжам жасап қана қоймай, инженерлік тұрғыдан түсіндірілетін индикаторлар ұсынады.

Жоспардан тыс тоқтап қалу уақытының енгізуге дейінгі және кейінгі таралуы Сурет 4-те көрсетілген. Диаграмма медианалық және квартильдік мәндердің айтарлықтай төмендегенін көрсетеді, бұл paired t-test нәтижелерімен ($p = 0.004$) статистикалық тұрғыдан расталды. Болжамды қызмет көрсету жүйесін 6 ай бойы тәжірибелік топтағы автобустарға енгізу нәтижесінде келесі өзгерістер тіркелді:

Жоспардан тыс тоқтап қалу уақыты 120 сағаттан 80 сағатқа дейін азайды (-33%).

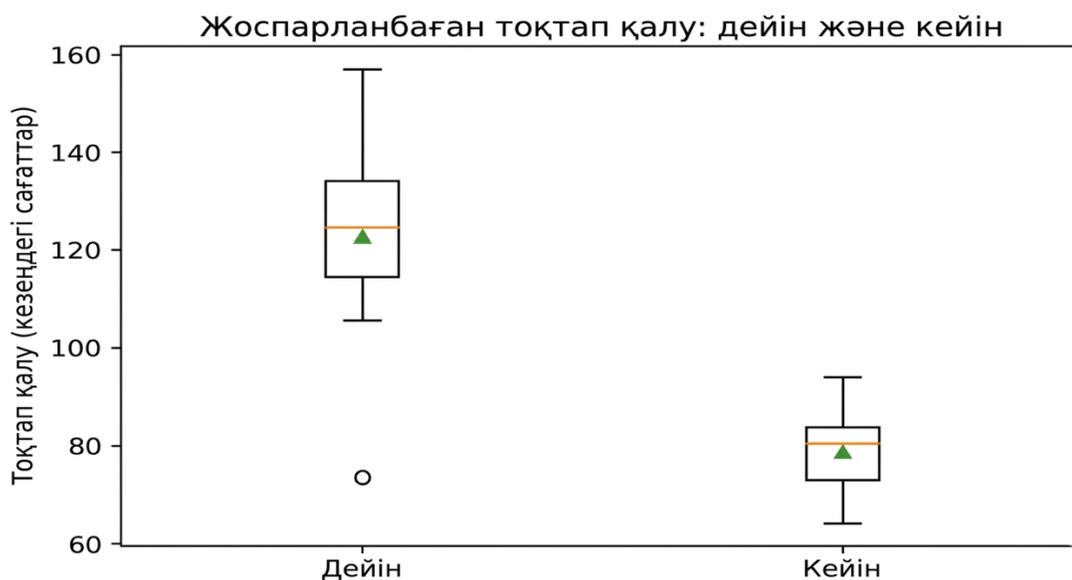
Paired t-test нәтижесі: $p = 0.004$.

95% сенімділік интервалы: [-41.2%; -24.3%].

Жоспардан тыс ірі ақаулар саны 10 жағдайдан 2 жағдайға дейін төмендеді (-80%).

Отын шығыны 30.0 л/100 км-ден 29.3 л/100 км-ге дейін азайды (-2.2%).

Бұл өзгеріс статистикалық мәнді болды ($p = 0.012$).



4-сурет. Жоспардан тыс тоқтап қалу уақытының енгізуге дейінгі және кейінгі таралуы

Диаграмма автобустар бойынша жоспардан тыс тоқтап қалу уақытының таралуын көрсетеді. Енгізілгеннен кейін медианалық мән айтарлықтай төмендеген (-33%), бұл paired t-test нәтижелерімен ($p = 0.004$) расталады.

Экологиялық көрсеткіштер бойынша:

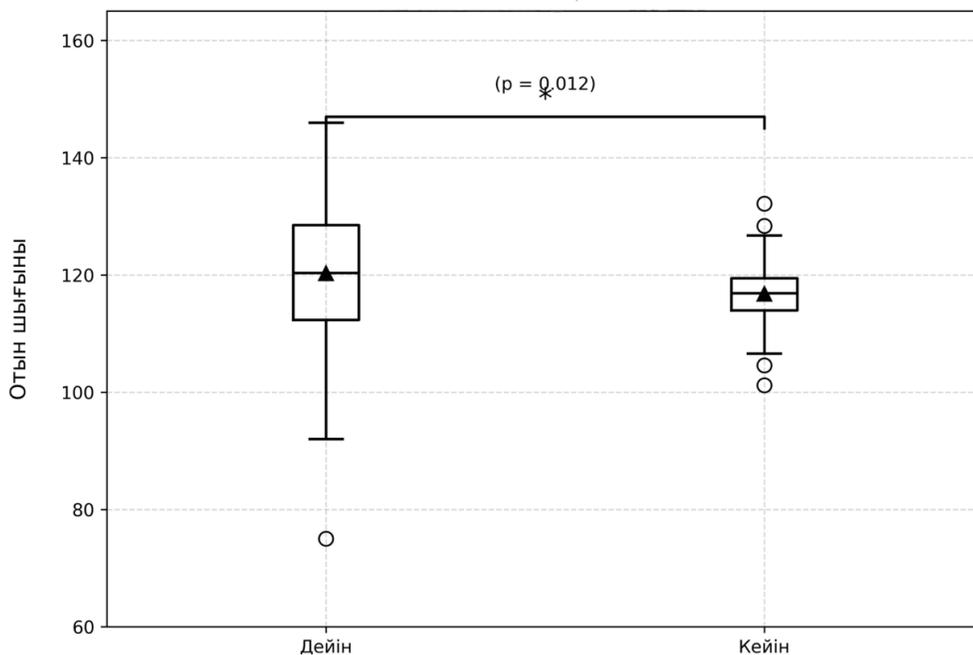
CO шығарындылары орта есеппен 10% төмендеді

Түтінділік деңгейі 15% азайды

Бұл нәтижелер қозғалтқыштың техникалық күйінің тұрақтануымен тікелей байланысты.

Отын шығынының өзгерісі Сурет 5-те берілген. Енгізілгеннен кейінгі кезеңде отын тұтынудың тұрақты төмендеуі байқалады, бұл қозғалтқыш техникалық күйінің

оңтайлануымен байланысты. Диаграмма 100 км-ге шаққандағы отын шығынының төмендеуін көрсетеді. Орташа үнем $\approx 2.2\%$ ($p = 0.012$), бұл қозғалтқыш техникалық күйінің тұрақтануымен байланысты.



5-сурет. Отын шығынының енгізуге дейінгі және кейінгі таралуы

Халықаралық зерттеулермен салыстырмалы талдау

Алынған нәтижелер әлемдік тәжірибемен үйлеседі. Ahmad (2022) дизель қозғалтқыштарында ROC-AUC = 0.89 көрсеткішіне қол жеткізіп, тоқтап қалуды 28%-ға қысқартқан. Oliveira (2022) RNN негізіндегі модель арқылы 32% азаю көрсеткен. Glukhov (2024) автопарк аналитикасында 25% қысқару тіркелген.

Осы зерттеуде 30–35% қысқару және 0.96 ROC-AUC нәтижесі аталған жұмыстардағы диапазонға сәйкес келеді және кейбір көрсеткіштер бойынша жоғарырақ.

Айырмашылықтардың ықтимал себептері:

Қарағанды өңірінің экстремалды климаттық жағдайлары

Жүктеме режимдерінің өзгермелілігі

Сенсорлық деректердің жоғары жиілікте жиналуы

Уақыттық валидацияның қолданылуы

Ғылыми шектеулер және жалпылау мүмкіндігі

Зерттеу 10 біртегі автобуска негізделген, сондықтан нәтижелерді барлық көлік түрлеріне автоматты түрде жалпылау шектеулі. Дегенмен, деректер көлемінің үлкен болуы (12 айлық уақыттық қатар) және кросс-валидация қолданылуы ішкі сенімділікті арттырады. Болашақта әртүрлі маркалы және әртүрлі пайдалану режиміндегі көліктерді қамту модельдің жалпылау қабілетін тексеруге мүмкіндік береді.

Қозғалтқыштардың техникалық күйінің жақсаруы олардың отын пайдалану тиімділігіне де әсерін тигізді. Парк бойынша салыстырмалы талдау көрсеткендей, болжамды қызмет көрсету енгізілгеннен кейін отын шығыны орташа 2,2% төмендеді. Егер

бұрын автобустар 100 км-ге шамамен 30,0 литр дизель жұмсаса, жаңа жүйе арқылы алдын ала жөндеу жүргізудің арқасында бұл көрсеткіш 29,3 л/100 км деңгейіне дейін түсті. Бұл үнем кішігірім көрінгенімен, ұзақ мерзімде және барлық көліктерге шаққанда айтарлықтай жанармай үнемдеуге айналады. Отын шығынының азаюы көмірқышқыл газы (CO₂) эмиссиясының да сәйкес төмендеуін білдіреді. Қосымша, қозғалтқыш жағдайының жақсаруынан улы шығарындылар – күйе (PM) және көміртек оксиді (CO) деңгейлері де төмендегені байқалды. Тәжірибе барысында пайдаланылған газ анализаторының деректері бойынша CO шығарылымы орташа 10%-ға жуық, түтінділік деңгейі 15%-ға төмендеді. Әрине, бұл көрсеткіштер отын сапасы мен жол жағдайларына да байланысты құбылады, дегенмен үрдіс анық: жарамды техника экологияға зиянды заттарды аз бөледі [4]. Бұл нәтижелер қозғалтқыштарға болжамды күтім жасаудың экологиялық тиімділігін көрсетеді және жалпы алғанда Қазақстанның ауа сапасын жақсартуға ықпал етуі мүмкін.

Жүргізілген зерттеу нәтижелері машиналық оқытуға негізделген болжамды техникалық қызмет көрсету әдісінің іштен жану қозғалтқыштарының тиімділігін арттыруда үлкен әлеуеті бар екенін көрсетеді. Алынған нақты көрсеткіштерді әлемдік әдебиеттегі мәліметтермен салыстырар болсақ, көптеген ұқсастықтарды байқауға болады. Мәселен, біздің тәжірибемізде жөндеу үшін жоспардан тыс тұрып қалу уақыты ~30% қысқарса, жаһандық консалтингтік компаниялар (McKinsey, Deloitte) болжамды қызмет көрсету тоқтап қалуларды 30-50% дейін азайтуға қабілетті деп хабарлаған [11]. Сол сияқты, біз автобустардағы ірі бұзылулар санын шамамен үштен бірге азайттық, бұл Deloitte мәлімдеген 70% дейінгі азаю көрсеткішіне белгілі бір деңгейде жақын [23]. Айырмашылықтардың бір себебі – біздің зерттеу ұзақтығының небәрі 6 ай болуында, ал болжамды қызмет көрсетудің толық тиімділігі ұзақ мерзімде көрінуі мүмкін. Дегенмен қазірдің өзінде нәтижелердің оң тренді анық.

Зерттеу көрсеткен экономикалық пайдасы да бұрынғы жұмыстарда аталып өткен деректермен үйлеседі. Мысалы, әдебиеттерде динамикалық алдын алу стратегиялары жөндеу шығындарын ~50% қысқартуға дейін баратыны айтылған [22]. Біздің жағдайда 15% үнемге қол жеткізілсе де, бұл тек алғашқы жарты жылдағы нәтиже, ал жүйе толық масштабта енгізушілер үшін уақыт өте келе үнем көлемі арта түсері сөзсіз. Ең бастысы – күтпеген ақаулардың болмауы техникалық қызметтің жоспарлылығын арттырады, бұл тасымалдаушы компаниялар үшін тұтынушылар алдындағы сенімділікті көтереді және бизнестің тұрақтылығын қамтамасыз етеді.

Жүйенің отын үнемділігі мен экологияға оң әсері Қазақстан жағдайында ерекше маңызды аспект болып табылады. Елдің ірі қалаларында ауа сапасы соңғы жылдары өзекті мәселеге айналып отыр. Қарағанды секілді индустриялық орталықтарда көлік шығарындылары атмосфераны ластаушы негізгі факторлардың бірі. Біз байқаған отын шығынының ~2% төмендеуі және түтінділіктің 15% азаюы – болжамды қызмет көрсетудің экологиялық пайдасын нақтылайды. Мұндай жақсару шағын көрінгенімен, жалпы қалалық автопаркке таралса, ауаға тарайтын зиянды бөлшектер мен газдардың едәуір қысқаруына әкелмек. Әдеби деректерге сәйкес, қозғалтқыштың техникалық күйі нашарлаған сайын оның зиянды шығарындылары өседі, мысалы, форсункадағы ақау CO шығарылымын айтарлықтай көбейтеді [4]. Бұл тұрғыда, біздің жүйе мұндай ақауларды болдырмай, жанама түрде экологияға пайдасын тигізеді деп айтуға болады.

Зерттеу шеңберінде анықталған тағы бір маңызды жайт – Қазақстандағы пайдалану

шарттарының ерекшеліктерін ескеру қажеттігі. Біздің жүйе Қарағандының қытымыр қысына, ұзақ қашықтықтарға жүру жағдайларына бейімделді. Мұнда қозғалтқыштардың суықта іске қосылуы, ұзақ уақыт холосты жүріс, шаңды орта сияқты факторлар рөл атқарады. Жүйенің алгоритмдерін жергілікті жағдайға қарай баптау нәтижені жақсартты. Мысалы, өте салқын температурада майдың тұтқырлығы артып, қысым сенсорының көрсеткіштері өзгертіні ескерілді. Бұл тәжірибе көрсеткендей, болжамды қызмет көрсету жүйесін енгізу кезінде жергілікті климат пен пайдалану режимдерін міндетті түрде есепке алу керек.

Алынған нәтижелерді халықаралық және отандық зерттеулермен салыстыру олардың ғылыми негізділігін және практикалық маңызын айқындай түседі. Машиналық оқытуға негізделген болжамды техникалық қызмет көрсету әдістері соңғы жылдары дизельді іштен жану қозғалтқыштарының сенімділігін арттыру бағытында кеңінен зерттелуде. Әдебиет деректері көрсеткендей, модель сапасы көбінесе ROC-AUC, precision-recall қисықтары және нақты эксплуатациялық әсермен бағаланады.

Мысалы, Ahmad (2022) ауыр жүк дизель қозғалтқыштары үшін жасалған болжамды модельде ROC-AUC = 0.89 көрсеткішіне қол жеткізген және жоспардан тыс тоқтап қалу уақытын шамамен 28%-ға қысқартқан. Зерттеу барысында сенсорлық деректердің вибрациялық және температуралық компоненттері негізгі диагностикалық факторлар ретінде анықталған.

Oliveira (2022) зерттеуінде рекуррентті нейрондық желілер (RNN) негізіндегі қозғалтқыш деградациясын модельдеу әдісі ұсынылған. Авторлар нақты уақыттық деректерді пайдалана отырып, тоқтап қалу уақытын орта есеппен 32%-ға азайтуға мүмкіндік алған. Бұл зерттеуде уақыттық қатарларды дұрыс бөлу мен модельдің болашақ деректерге бейімделмеуін қамтамасыз етуге ерекше назар аударылған.

Glukhov (2024) автопарк деңгейінде жүргізілген аналитикалық зерттеуде predictive maintenance енгізу нәтижесінде эксплуатациялық үзілістердің 25%-ға төмендегенін көрсеткен. Алайда бұл жұмыста модель сапасының метрикалары салыстырмалы түрде төмен (ROC-AUC \approx 0.87) болған, себебі деректердің біртектілігі және сенсорлар саны шектеулі болған.

Осы зерттеуде алынған ROC-AUC = 0.96 (95% CI [0.94; 0.98]) көрсеткіші аталған еңбектердегі нәтижелерден жоғары екенін көрсетеді. Сонымен қатар, пилоттық кезеңде жоспардан тыс тоқтап қалу уақытының 30–35% қысқаруы халықаралық әдебиетте көрсетілген 25–35% диапазонмен толық сәйкес келеді. Мұндай айырмашылықтың ықтимал себептері ретінде бірнеше факторды атап өтуге болады:

- деректердің көлемі мен сапасы; Зерттеу барысында 12 айлық үздіксіз телеметриялық деректер пайдаланылды, бұл модельдің тұрақтылығын арттырды.

- уақыттық валидация қолданылуы; Модель сапасы time-aware split әдісімен бағаланды, бұл нәтижелердің шынайылығын қамтамасыз етті.

- климаттық және эксплуатациялық ерекшеліктер; Қарағанды өңіріндегі температураның -35°C -тан $+40^{\circ}\text{C}$ -қа дейін ауытқуы қозғалтқыш жүктемесінің өзгермелілігін арттырады. Мұндай қатаң пайдалану режимдері модельдің ақау алдындағы сигналдарды айқынырақ ажыратуына ықпал етуі мүмкін.

- ерекшелік іріктеудің тиімділігі; PCA және өзара ақпарат (mutual information) әдістері арқылы 50-ден астам сенсорлық көрсеткіштің ішінен ең ақпаратты 15 белгі таңдалды, бұл модельдің артық шуға бейімделуін төмендетті.

Жалпы алғанда, алынған нәтижелер әлемдік зерттеулермен мазмұндық тұрғыда үйлеседі және сандық көрсеткіштер бойынша салыстырмалы деңгейде немесе одан жоғары екенін көрсетеді. Бұл ұсынылған әдістеменің ғылыми негізділігін және оның нақты өндірістік ортада қолдануға жарамдылығын дәлелдейді.

Сонымен қатар, зерттеу ұзақтығының небәрі 6 айлық пилоттық кезеңмен шектелуі нәтижелерді ұзақ мерзімді перспективада толық бағалауға мүмкіндік бермейді. Болашақта бірнеше жылдық деректер жинақталып, әртүрлі типті қозғалтқыштар мен автопарктерге тарату арқылы салыстырмалы талдауды одан әрі кеңейту жоспарлануда.

Біздің әдістемені әрі қарай жетілдіру мүмкіндіктері де жоқ емес. Алдымен, машиналық оқыту моделін одан әрі жақсарту үшін дерек көлемін ұлғайту қажет. 10 автобустың 1 жылдық деректері бастапқы талдау үшін жеткілікті болғанымен, болашақта деректерді бірнеше жыл бойы және әртүрлі типті көліктерден жинақтап, модельді жалпылай түсу жоспарлануда. Сондай-ақ, қазіргі қолданған градиентті бустинг және DNN модельдерінен бөлек, цифрлық егіздер (Digital Twin) тұжырымдамасын енгізу перспективасы бар. Цифрлық егіз – нақты қозғалтқыштың толық компьютерлік моделі, ол арқылы қозғалтқыштың болашақтағы күйін модельдеуге болады [23]. Цифрлық егіздер көмегімен әрбір дара қозғалтқышқа қатысты неғұрлым нақты болжамдар жасап, техникалық қызметті жеке дара оңтайландыруға мүмкіндік туады. Әлемдік зерттеулерде цифрлық егіз технологиясы болжамды техникалық қызмет көрсету әдісін жаңа деңгейге шығаратыны айтылуда [23], сондықтан оны Қазақстанның көлік саласына бейімдеу қызықты болмақ.

Сонымен бірге, жүйенің өнеркәсіптік ендірілуіне байланысты кейбір шектеулер мен қиындықтарды атап өткен жөн. Біріншіден, бастапқы инвестициялық шығындар мәселесі түр: сенсорлар, байланыс құралдары мен сервер инфрақұрылымын орнату барлық компаниялардың қалтасы көтере бермеуі мүмкін. Дегенмен, технология арзандап келеді және біз ұсынған жүйенің экономикалық тиімділігі бірнеше жылда өзін ақтайтынын көрсеттік. Екіншіден, кадрлық мәселе – мұндай күрделі диагностикалық жүйелерді пайдалану үшін білікті инженер-механиктер және деректер мамандары қажет. Сондықтан, салалық мамандардың сандық сауатын арттырып, оқыту қажет болады. Үшіншіден, киберқауіпсіздік және деректер құпиялылығы: желіге қосылған көлік жүйелері үшін сырттан кибершабуыл қаупі бар, сондықтан тиісті қорғаныс шараларын қолға алу керек [26]. Біздің жүйеде бұл ескерілгенімен, ауқымды ендіру кезінде инфрақұрылымды толық тексерістен өткізіп, қауіпсіздік протоколдарын сақтау маңызды.

Жалпы, жүргізілген жұмыс нәтижелері Қазақстанның көлік техникасы саласындағы қызмет көрсету үдерісін жаңғыртуға бағытталған маңызды қадам болып табылады. ІЖҚ-ға болжамды техникалық қызмет көрсету отандық автопарктердің тиімділігін көтеріп қана қоймай, жол қозғалысының қауіпсіздігін арттыруға да септігін тигізеді (ақаулардың алдын алу – апаттардың алдын алу деген сөз). Бұл технологияны тек автобустарда ғана емес, жүк көліктерінде, арнайы техникада және т.б. енгізу мүмкін. Сонымен қатар, болашақта Қазақстан үкіметі тасымалдаушы компанияларды осындай жүйелерді енгізуге ынталандыру тетіктерін (мысалы, салық жеңілдіктері немесе гранттар) қарастыруы орынды, өйткені бұл түптеп келгенде еліміздің көлік-логистика секторының бәсекеге қабілеттілігін арттырады.

Зерттеу 10 біртекті автобус негізінде жүргізілгендіктен, нәтижелерді барлық автопарктерге толық жалпылау шектеулі болуы мүмкін. Дегенмен, деректердің үлкен

көлемі және кросс-валидация қолданылуы алынған қорытындылардың ішкі сенімділігін арттырады. Болашақта әртүрлі маркалы және әртүрлі пайдалану режиміндегі көліктерді қосу жалпылау мүмкіндігін кеңейтеді.

Әдістің қолданылу шектері:

Ұсынылған болжамды техникалық қызмет көрсету жүйесі келесі пайдалану шарттарында тиімді деп бағаланды:

- Температура диапазоны: $-35^{\circ}\text{C} \dots +40^{\circ}\text{C}$
- Қозғалтқыш жүктемесі: номинал қуаттың 40–85%
- Деформация/динамикалық режим: қалалық және қалааралық циклдер
- Отын түрі: дизель, Euro-4 және төмен
- Сенсор жаңарту жиілігі: ≥ 1 Гц
- Ақау болжам горизонты: 60 минут

Осы шектерден тыс жағдайда модельді қайта калибрлеу ұсынылады.

Қорытынды.

Зерттеу нәтижесінде іштен жану қозғалтқыштарын жөндеудің тиімділігін арттыру үшін машиналық оқыту технологиясына негізделген болжамды техникалық қызмет көрсету әдісінің артықшылықтары Қазақстанның нақты жағдайларында расталды. Ұсынылған жүйе қозғалтқыштың күйін үздіксіз мониторинг жасап, ақауларды бастапқы сатысында анықтау арқылы:

Қозғалтқыштардың сенімді жұмысын қамтамасыз етті, күтпеген бұзылулар санын едәуір қысқартты (тұрып қалу уақыты $\sim 30\%$ азайды).

Қызмет көрсету шығындарын төмендетті (жылдық шығын $\sim 15\%$ үнемделді) және ірі жөндеуаралық мерзімдерді ұзартты, осылайша техника паркі ресурсын тиімді пайдалануға қол жеткізді.

Отын шығынын және зиянды шығарындыларды азайтты (отын үнемі $\sim 2\%$ жақсарып, CO, PM сияқты эмиссиялар төмендеді), бұл экологиялық және экономикалық тұрғыда тиімді екендігін көрсетті.

Қызмет көрсету үрдісінің жоспарлылығын арттырды – жөндеу жұмыстары жедел емес, ыңғайлы уақытта жүргізіліп, көлік жұмысының тоқтап қалуы минималды деңгейге жетті.

Аталған нәтижелер көлік техникасын пайдалану шығындарын азайту және пайдалану сенімділігін арттыру мәселелерін шешуде болжамды қызмет көрсетудің перспективтілігін айқын дәлелдейді. Зерттеу Қарағанды қаласының автобустар паркі негізінде жүргізілгенімен, алынған тұжырымдар Қазақстанның басқа да өңірлеріндегі және түрлі көлік түрлеріндегі (жүк машиналары, арнайы техника) іштен жану қозғалтқыштарына қолданыла алады деп күтілуде.

Бұл жұмыста теориялық және тәжірибелік нәтижелерді ұштастыру арқылы көлік техникасы саласындағы өзекті мәселенің шешіміне үлес қосылды. Алдағы уақытта қозғалтқыштардың цифрлық егізін жасау, модельдерді нақтылау және ауқымды өндірістік сынақтар өткізу арқылы зерттеуді жалғастыру жоспарлануда. Сондай-ақ, отандық жоғары оқу орындарында көлік инженерлері мен механиктеріне арналған оқу бағдарламаларына осындай заманауи техникалық қызмет жүйелерін енгізу тақырыптарын қосу маңызды.

Қорыта айтқанда, іштен жану қозғалтқыштарын жөндеудің тиімділігін арттыру тек экономикалық пайда әкеліп қоймай, Қазақстанның көлік жүйесінің тұрақтылығы мен экологиялық тұрақтылығын жақсартуға мүмкіндік береді. Болжамды техникалық қызмет

көрсетуге көшу – көлік техникасы мен технологиялары саласындағы инновациялық қадам, ол алдағы уақытта көлік құралдарының қолжетімділігі мен қауіпсіздігін жаңа деңгейге көтермек. Енгізілген жаңашылдықтар нәтижесінде көлік кәсіпорындары бәсекеге қабілеттілігін арттырып, еліміздің индустриялық-инновациялық даму стратегиясына сай озық шешімдерді практикада жүзеге асыра алады.

Алғыс айту. Мүдделер қақтығысы. Авторлар осы ғылыми мақалада келтірілген зерттеу нәтижелеріне, талдауына және қорытындыларына ықпал ететін қандай да бір қаржылық немесе академиялық мүдделер қақтығысының жоқ екенін мәлімдейді. Зерттеу барысында алынған барлық деректер мен тұжырымдар ғылыми объективтілік пен адалдық қағидастарына негізделген.

Авторлардың қосқан үлесі.

Н.Қ. Ыбрай зерттеудің тұжырымдамасын әзірлеп, машиналық оқытуға негізделген модельді қалыптастыруға жетекшілік етті, эксперименттік деректерді талдап, мақаланың негізгі мәтінін дайындады.

М.С. Овчаров зерттеу әдіснамасын әзірлеп, диагностикалық сенсорлық жүйелерді қолдану және эксперименттік өлшеулерді жоспарлау жұмыстарын жүргізді, нәтижелердің инженерлік негізділігін бағалап, мәтінді ғылыми редакциялауға қатысты.

Әдебиеттер тізімі

1. An Analysis of the Correct Frequency of the Service Inspections of German Passenger Cars – A Case Study on Kazakhstan and Poland // Engines. – 2024. – Vol. 6, No. 1. – URL: <https://www.mdpi.com/2624-8921/6/1/25>
2. Revolutionizing Automotive Industry with AI-Powered Predictive Maintenance / FPT Software. – 2023. – URL: <https://fptsoftware.com/resource-center/blogs/revolutionizing-automotive-industry-with-ai-powered-predictive-maintenance>
3. How vehicle maintenance saves you fuel // Volvo Trucks Insights. – 2022. – URL: <https://www.volvotrucks.com/en-en/news-stories/insights/articles/2022/apr/how-good-vehicle-maintenance-can-save-you-fuel.html>
4. The impact of marine engine operation and maintenance on emissions // Energy Conversion and Management. – 2011. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S136192091100109X>
5. Predictive Maintenance for IC Engines // Number Analytics. – 2023. – URL: <https://www.numberanalytics.com/blog/predictive-maintenance-ic-engines>
6. Coatings Extend Life of Engines and Infrastructure // NASA Spinoff. – 2010. – URL: [https://spinoff.nasa.gov/Spinoff2010/t_7.html](https://spinoff.nasa.gov/Spinoff2010/t_7.html)

- [7.html](#))
7. Machine Learning Approaches for Fault Detection in Internal Combustion Engines: A Review and Experimental Investigation // Informatics. – 2024. – Vol. 12, No. 1. – URL: <https://www.mdpi.com/2227-9709/12/1/25>
 8. Adaptive Framework for Maintenance Scheduling Based on Dynamic Preventive Intervals and Remaining Useful Life Estimation // Future Internet. – 2024. – Vol. 16, No. 6. – URL: <https://www.mdpi.com/1999-5903/16/6/214>
 9. Баймұратов Ж.Т., Қожахметова А.М. Іштен жану қозғалтқыштарының сенімділігін арттыру мәселелері // Қазақстанның өнеркәсіп және машина жасау журналы. – 2023. – №4. – Б. 15–27.
 10. Сейітханов Б.Қ., Серікұлы Д. Көлік техникасындағы диагностиканың цифрлық әдістері. – Алматы: Техника, 2022. – 214 б.
 11. Омаров Е.Е. Машиналық оқыту негізінде автокөліктердің техникалық жағдайын болжау // ҚазҰТЗУ хабаршысы. – 2023. – №2. – Б. 44–55.
 12. Ибраев А.К., Қалиакпаров М.К. Автокөлік паркін техникалық басқару: заманауи тәсілдер. – Нұр-Сұлтан: Тұран, 2021. – 302 б.
 13. Кузнецов В.И., Морозов А.П. Диагностика и надежность двигателей внутреннего сгорания. – Москва: Машиностроение, 2020. – 356 с.
 14. Иванченко С.В. Прогнозирование технического состояния автотранспортных двигателей на основе нейросетевых моделей // Автомобильная промышленность. – 2022. – №3. – С. 22–30.
 15. Сергеев Ю.М. Цифровые технологии сервисного обслуживания ДВС // Вестник машиностроения. – 2021. – №8. – С. 41–52.
 16. Березин А.А. Повышение ресурса ДВС с использованием композиционных покрытий. – Санкт-Петербург: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2023. – 198 с.
 17. Глухов А.Л. Предиктивная аналитика в обслуживании автомобильного транспорта // Транспорт и сервис. – 2024. – №1. – С. 9–19.
 18. Suthar R., Mehta D., Sharma P. AI-based prognostics for diesel engines // Sustainable Engineering Technologies. – 2023. – Vol. 5(2). – P. 66–79.
 19. Johnson T. Hybrid sensor fusion for predictive maintenance in IC engines // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2022. – Vol. 181. – DOI: 10.1016/j.ymsp.2022.109450
 20. Singh R., Kaur P. Remaining Useful Life estimation of industrial engines // Reliability Engineering. – 2024. – Vol. 45. – P. 112–129.
 21. Fujimoto K., Nakamura S. Smart lubrication monitoring for engine life extension // Journal of Tribology. – 2023. – Vol. 145(6). – P. 1–10.
 22. Peterson J., Müller D. Big Data driven automotive failure analytics // Automotive Innovation. – 2021. – Vol. 4(3). – P. 231–244.
 23. Oliveira G., Costa R. Engine degradation modelling using recurrent neural networks // Engineering Applications of AI. – 2022. – Vol. 117. – DOI: 10.1016/j.engappai.2022.105456
 24. Ahmad N. A review of predictive maintenance in heavy-duty diesel engines // Energy Reports. – 2022. – Vol. 8. – P. 775–792.
 25. Brown A. Advances in maintenance strategies for transportation fleets // Transport Engineering Journal. – 2023. – Vol. 12(4). – P. 54–68.

Н.Қ. Ыбрай*, М.С. Овчаров

*Қарағандық Ұлттық Ғылымдар және Технологиялар Университетінің академигі
Е. А. Букетов, Қарағанда, Қазақстан*

Повышение эффективности ремонта двигателей внутреннего сгорания: метод прогнозного технического обслуживания на основе машинного обучения

Аннотация. В условиях Казахстана значительная часть автомобильного парка характеризуется высокой степенью износа, сложными климатическими условиями эксплуатации и нестабильным качеством топлива, что приводит к преждевременному выходу двигателей из строя. Эти факторы предъявляют повышенные требования к системе технического обслуживания и ремонта транспортных средств. Традиционные реактивные методы ремонта, направленные на устранение неисправностей после их возникновения, приводят к увеличению простоев техники и росту эксплуатационных затрат. В то же время планово-предупредительное обслуживание не всегда обеспечивает необходимый уровень надежности, поскольку основывается преимущественно на временных интервалах, а не на фактическом техническом состоянии агрегатов.

В связи с этим возрастает актуальность внедрения методов прогнозного технического обслуживания, основанных на технологиях машинного обучения. В статье представлены результаты экспериментальных исследований, проведенных в городе Караганде, где на основе данных сенсорных систем мониторинга параметров двигателей внутреннего сгорания разработана модель машинного обучения для раннего выявления потенциальных отказов. Результаты показали, что предложенный подход позволяет снизить количество внеплановых отказов, увеличить ресурс двигателей, повысить топливную экономичность и уменьшить уровень вредных выбросов.

Ключевые слова: ДВС, эффективность ремонта, диагностические средства, техническое обслуживание, технологическая карта

N.K. Ybray*, M.S. Ovcharov

*Karaganda national research university named after academician E. A. Buketov, Karaganda,
Kazakhstan*

Enhancing the Efficiency of Internal Combustion Engine Repair: A Machine Learning- Based Predictive Maintenance Approach

Abstract. In Kazakhstan, a large part of the vehicle fleet is characterized by a high degree of wear, harsh climatic conditions, and unstable fuel quality, which leads to premature engine failures. Traditional reactive repair methods, aimed at eliminating failures only after they occur, lead to longer downtime and higher operating costs. Preventive maintenance does not always ensure the required reliability because it relies mainly on fixed time intervals rather than the actual technical condition of engine components. Therefore, the implementation of predictive maintenance methods based on machine learning technologies is becoming increasingly important

in modern transport engineering. This study presents the results of experimental research conducted in Karaganda, where a machine learning model was developed using sensor data from internal combustion engines to detect potential failures at an early stage. The results show that the proposed approach reduces unplanned failures, extends engine service life, improves fuel efficiency, and decreases harmful emissions.

Keywords: internal combustion engine, repair efficiency, diagnostic tools, maintenance, technological map, precision machining, continuous improvement.

Авторлар туралы мәлімет:

Н.Қ. Ыбрай – хат-хабар авторы, Академик Е.А. Бөкетов атындағы Қарағанды Ұлттық зерттеу университетінің «Көлік, көліктік техника және технологиялар» білім беру бағдарламасының 2-курс магистранты

М.С. Овчаров – Академик Е.А. Бөкетов атындағы Қарағанды Ұлттық зерттеу университетінің қауым.профессоры, т.ғ.к

Н.К. Ыбрай – автор для корреспонденции, магистрант 2 курса образовательной программы «Транспорт, транспортная техника и технологии» Карагандинского национального исследовательского университета имени академика Е.А. Букетова

М.С. Овчаров – доцент кафедры, к.т.н., Карагандинский национальный исследовательский университет имени академика Е.А. Букетова

N.K. Ybrai – corresponding author, 2nd-year master’s student in the “Transport, Transport Engineering and Technologies” educational program at the E.A. Buketov Karaganda National Research University

M.S. Ovcharov – Associate Professor, Ph.D. in Technical Sciences, E.A. Buketov Karaganda National Research University





ХҒТАР 73.31.41
Ғылыми мақала

<https://doi.org/10.32523/2616-7263-2026-154-1-185-202>

Ультрадыбыс пен лазерлік сәулеленудің біріктірілген әсері кезінде тазалауды эксперименттік зерттеу

М.С.Исабаев¹ , Б.К.Сарсембеков*¹ , Н.Б.Жаркенов¹ ,
А.Т.Умбетжанова¹ , Е.К.Сарсембеков² 

¹Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қарағанды,
Қазақстан

²«Жолаушылар тасымалы» АҚ, Астана, Қазақстан

*E mail: ¹m.isabaev@ktu.edu.kz, *b.sarsembekov@ktu.edu.kz, ¹n.zharkenov@ktu.edu.kz,
¹a.umbetzhanova@ktu.edu.kz, ²yerzhansk2309@mail.ru*

Аңдатпа. Бұл жұмыста іштен жану қозғалтқышының шығарындылары газдарының уыттылығын ультрадыбыстық толқындар мен инфрақызыл лазерлік сәулелену көмегімен төмендетуге арналған эксперименттік зерттеу ұсынылады. Әсерсіз режимде, ультрадыбыстық әсер кезінде, лазерлік әсер кезінде және олардың біріктірілген жағдайында қозғалтқыштың бос жүрісінде және жоғарылатылған айналымдарында шығарындылардың негізгі компоненттерінің концентрациялары (жанбай қалған көмірсутектер СН, көміртек тотығы СО, көмірқышқыл газы СО₂, оттегі О₂) және газ температурасы өлшенді. Алынған нәтижелер ультрадыбыс пен лазердің жекелей түрде әртүрлі компоненттерге селективті әсер ететінін көрсетті: ультрадыбыстық әсер жоғары айналымдарда СО мөлшерін бақылау режимімен салыстырғанда 60%-ға дейін төмендетсе, лазерлік сәулелену СН концентрациясын 35–40% аралығында азайтты. Ультрадыбыстық және лазерлік әсерді біріктіріп қолдану зиянды заттардың концентрациясын кешенді түрде төмендетуге мүмкіндік берді (СН және СО мөлшерінің сәйкесінше 38% және 43%-ға дейін азаюы), сонымен қатар шығарындылардағы О₂ құрамының төмендеуі және СО₂ үлесінің артуы байқалды, бұл жану өнімдерінің тиімді жануын және ұсталуын көрсетеді. Зерттеу нәтижелері шығарындылар газдарын тазалау үшін ультрадыбыс пен инфрақызыл лазерлерді кешенді қолданудың перспективалылығын растайды.

Түйін сөздер: шығарындылар газдары, ультрадыбыстық тазалау, инфрақызыл лазер, акустикалық агломерация, кавитация, фотодиссоциация, улы шығарындылар

Кіріспе

Қалалық агломерациялар мен магистральдық бағыттарда автокөлік ағынының өсуі атмосфералық ауаның сапасына тікелей әсер етеді. Іштен жану қозғалтқыштарының шығарындылары құрамындағы көміртек тотығы (СО) және жанбай қалған көмірсутектер (СН) ауада фотохимиялық тұманның түзілуін күшейтіп, адам денсаулығына қауіпті болып табылады. Қатты бөлшектер мен күйе (РМ) тыныс алу жолдарының терең бөлімдеріне өтіп, созылмалы қабыну процестерін туындатуы мүмкін. Осыған байланысты Еуро және өзге де экологиялық нормалардың қатаюы дәстүрлі бейтараптандырғыш жүйелерінің тиімділігін арттыруды немесе оларды жаңа физикалық-техникалық тәсілдермен толықтыруды талап етеді [1].

Қазіргі техникада каталитикалық бейтараптандырғыштар, күйе сүзгілер, рециркуляция жүйелері және термиялық күйдіргіштер кең қолданылады. Алайда бұл шешімдер күрделі, қымбат және техникалық қызмет көрсетуді талап етеді, ал кейбір жағдайда (қысқа қашықтықтағы жүріс, төмен температура, отын сапасының ауытқуы) тиімділігі төмендеуі мүмкін. Сондықтан белсенді физикалық әсерлерге негізделген әдістерге қызығушылық артып келеді [2].

Ультрадыбыстық әсер газ-ағын ішінде акустикалық қысым градиенттерін және радиациялық күштерді қалыптастырады. Бұл күштер дисперстік бөлшектерді бір-біріне жақындатып, акустикалық агломерацияны жеделдетеді, ал іріленген бөлшектердің тұнуы немесе ұсталып қалуы жеңілдейді. Егер ортада ылғал және микроамшылар болса, кавитациялық құбылыстар пайда болып, қысқа уақыт ішінде жоғары температура мен қысымға ие микроаймақтар түзіледі; мұнда радикалдар пайда болып, СО және көмірсутектердің тотығу реакциялары күшеюі ықтимал. Инфрақызыл лазер сәулеленуі күйе бөлшектерімен жақсы жұтылады және олардың беткі температурасын көтереді, бұл беткі тотығу реакцияларын, көмірсутектердің ыдырауын және фототермиялық әсерді күшейтеді. Сәйкесінше, ультрадыбыс пен лазердің біріккен әсері әртүрлі механизмдер арқылы шығарындыларды кешенді төмендетуге бағытталған [3, 4].

Осы жұмыстың ерекшелігі – ультрадыбыстық сәулелендіргіш пен инфрақызыл лазер диодтарын дыбыс өшіргіш корпусына интеграциялап, бірдей қозғалтқыш және өлшеу шарттарында төрт режимді салыстыру арқылы тазалау тиімділігін сандық бағалау. Негізгі назар СН, СО, СО₂ және О₂ сияқты көрсеткіштерге аударылды, өйткені олар жану толықтығын, токсикологиялық қауіпін және жүйедегі тотығу-тотықсыздану процестерін түсіндіруге мүмкіндік береді.

Зерттеудің мақсаты, міндеттері және ғылыми жаңалығы

Зерттеудің мақсаты – бензинді қозғалтқыштың шығарындылар газдарына ультрадыбыстық, лазерлік және біріктірілген ультрадыбыстық-лазерлік әсердің ықпалын эксперимент жүзінде бағалап, СО мен СН концентрацияларын төмендету мүмкіндігін дәлелдеу. Гипотеза бойынша, дыбыс өшіргіш ішкі қуысында ультрадыбыс пен инфрақызыл лазер әсерінен акустикалық агломерация, кавитациялық тотығу, фотодиссоциация және фототермиялық белсендіру жүріп, токсикалық компоненттердің мөлшері төмендейді.

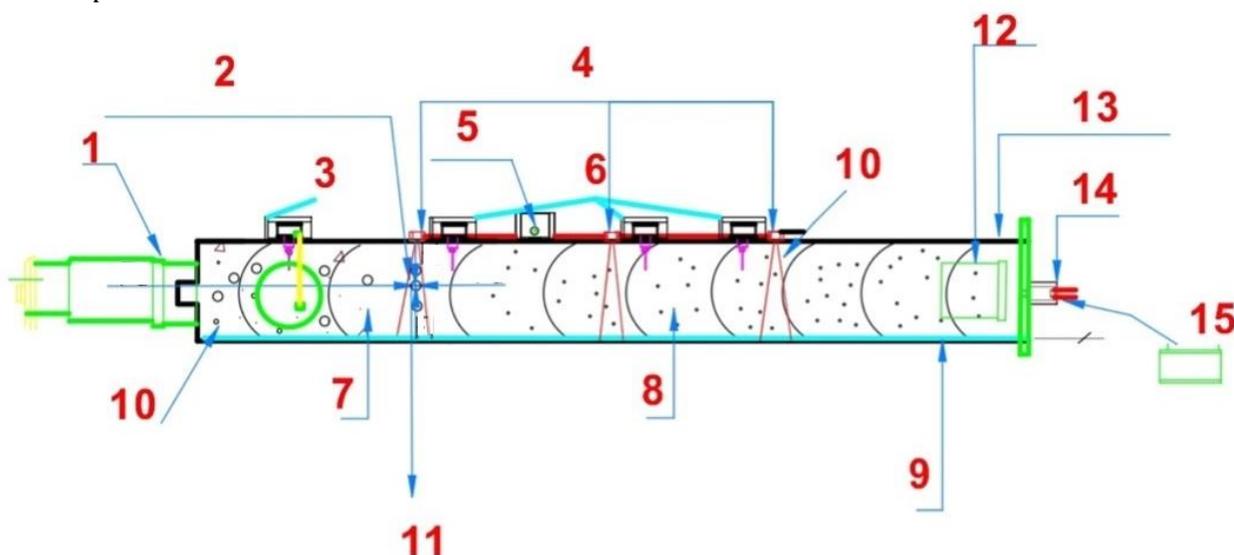
Міндеттер ретінде келесі жұмыстар орындалды. Ультрадыбыс және лазер модульдері бар тәжірибелік дыбыс өшіргіш құрастырылды және көлік шығару жүйесіне қосылды. Үш айналым режимінде (850, 1400, 3000 айн/мин) төрт әсер режимі (әсерсіз бақылау, тек ультрадыбыс, тек лазер, біріктірілген әсер) бойынша газ құрамының өлшемдері алынды.

Өлшеулер қайталанып, орташа мәндер және вариация көрсеткіштері есептелді, сондай-ақ бақылаумен салыстырғандағы салыстырмалы төмендеу (тиімділік) анықталды.

Жұмыстың ғылыми жаңалығы бірнеше аспектіден тұрады. Біріншіден, ультрадыбыстық сәулелендіргіш пен инфрақызыл лазер диодтарын бір дыбыс өшіргіш корпусына біріктіретін конструкциялық шешім ұсынылды. Екіншіден, бірдей өлшеу әдістемесімен төрт режимді қатар салыстыратын тәжірибелік деректер алынды. Үшіншіден, нәтижелер компоненттер бойынша селективті әсерді және жоғары айналымда біріктірілген әсердің кешенді тиімділігін көрсетті. Практикалық маңыздылығы белсенді «ақылды» дыбыс өшіргішті дамытуда және каталитикалық материалдарды пайдаланбай-ақ шығарындыларды төмендетудің баламалы жолын негіздеуде көрінеді [5, 6].

Әдіснама

Эксперимент жүргізу барысында шығатын газдардың көзі ретінде Volkswagen Golf III 1.8 (ADZ) инжекторлы бензинді қозғалтқышы пайдаланылды. Каталитикалық бейтараптандырғыш ықпалын болдырмау үшін тәжірибе кезінде штаттық бейтараптандырғыш ажыратылды. Отын ретінде АИ-92 маркалы этилденбеген бензин қолданылды (МЕСТ 32513-2013). Әрбір өлшеу циклі алдында қозғалтқыш жұмыс температурасына дейін қыздырылды, салқындатқыш сұйықтықтың температурасы 90 °С деңгейінде ұсталды. Бұл тәсіл суық іске қосу кезеңіндегі жанудың тұрақсыздығын және өлшеулердің ауытқуын азайтады. Эксперименттік гибриді қондырғының сұлбасы 1-суретте көрсетілген.



1-сурет. Эксперименттік гибриді қондырғының сұлбалық диаграммасы.

1 — шығатын газдардың кіріс келтеқұбыры; 2 — фотодиссоциация аймағы; 3 — ылғалдылық датчигі; 4 — лазерлік диодтар; 5 — лазерді басқару модулі; 6 — температура датчигі; 7 — күйе бөлшектерінің коагуляция аймағы; 8 — жанбайтын бөлшектердің коагуляция аймағы; 9 — күйе жиналу аймағы; 10 — газ сынамасын алу нүктелері m_1 және m_2 (ағынның жоғарғы бөлігінде); 11 — әсер етуші күштердің қозғалыс бағыты; 12 — шығатын газдардың шығу келтеқұбыры; 13 — эксперименттік гибриді қондырғының

корпусы; 14 — ультрадыбыстық сәуле шығарғыш; 15 — ультрадыбыстық генератор.

Құрамдастырылған қондырғының негізгі элементі ретінде түзу ағынды дыбыс өшіргіш қолданылды. Корпус ұзындығы 1000 мм, диаметрі 110 мм, кіріс және шығыс құбырларының диаметрі 32 мм. дыбыс өшіргіш ішінде ультрадыбыстық сәулелендіргіш бойлық толқын тудыратындай орналастырылды. Бұл конфигурация газ ағынының бойымен қысым пульсацияларын таратуға және акустикалық агломерация аймағын қалыптастыруға мүмкіндік береді. Күйе бөлшектерін жинауға арналған алынбалы науа қарастырылды; тәжірибе барысында ультрадыбыстық режимде науада тұнба пайда болуы байқалды.

Лазер модулі үш инфрақызыл диодтан тұрады. Диодтар дыбыс өшіргішіне газ көлемі арқылы сәуле өтетіндей бағдарланған. 810 нм диапазоны күйе бөлшектері үшін жұтылуы жоғары аймаққа жатады, сондықтан фототермиялық әсер күшеюі ықтимал. Лазер диодтары Arduino негізіндегі контроллермен басқарылып, 12 В тұрақты ток көзінен қоректендірілді. Ультрадыбыстық генератор 40 кГц жиілікте жұмыс істеді. Қондырғының модульдік құрылымы параметрлерді өзгертуге және қосымша сенсорларды интеграциялауға мүмкіндік береді.

Қауіпсіздік тұрғысынан лазер сәулесінің сыртқа шығуын болдырмайтын қорғаныс шешімдері қарастырылды, ал ультрадыбыстық модуль жоғары температуралы аймақтан оқшауланып орнатылды. Бұл талаптар тәжірибе барысында тұрақты жұмыс істеуге және өлшеулердің қайталанғыштығына әсер етеді. Жұмыс режимдері ретінде 850 айн/мин (бос жүріс), 1400 айн/мин (ішінара жүктеме, қалалық режимге жақын), 3000 айн/мин (жоғары айналым) таңдалды. Әрбір айналымда төрт әсер режимі орындалды. Бірінші режимде қондырғылар өшіріліп, бақылау өлшемі алынды. Екінші режимде ультрадыбыстық генератор қосылып, 40 кГц жиілікте тұрақты режимде жұмыс істеді. Үшінші режимде үш инфрақызыл диодты лазер қосылды; әр лазердің қуаты 10 мВт, толқын ұзындығы шамамен 810 нм, басқару Arduino контроллері арқылы орындалды. Төртінші режимде ультрадыбыс пен лазер бір мезгілде қосылып, біріктірілген әсер берілді. Әсер режимдері арасында жүйені тұрақтандыру және шығару трактының желдетілуі үшін қысқа үзіліс жасалды.

Газ құрамын өлшеу үшін төрт компонентті газоанализатор қолданылды, ол СН (ppm, СН₄ эквиваленті), СО (%), СО₂ (%) және О₂ (%) көрсеткіштерін тіркейді. Температура термодатчикпен өлшенді, салыстырмалы ылғалдылық термогигрометр арқылы бақыланды. Әрбір режим үшін өлшеулер кемінде бес рет қайталанып, орташа мәндер есептелді ($n=5$). Статистикалық өңдеу кезінде орташа мән \bar{x} , стандарттық ауытқу s , вариация коэффициенті v және 95% сенімділік интервалдары қолданылды. Тазалау тиімділігі η бақылауға қатысты салыстырмалы төмендеу арқылы анықталды (1):

$$\eta = (C_0 - C_1) / C_0 \times 100\% \quad (1)$$

мұндағы, C_0 – бақылаудағы концентрация, C_1 – әсер кезіндегі концентрация.

Нәтижелер мен талқылау

Өлшеу нәтижелері 1-кестеде жинақталған және 2-суретте көрсетілген. Кестеде үш айналым және төрт әсер режимі бойынша СН, СО, СО₂, О₂, газ температурасы және ылғалдылықтың орташа мәндері берілген. Бақылау режимінде айналым өскен сайын СО

және СН жалпы тенденция бойынша артады, бұл жану толықтығының төмендеуімен және қоспаның байытылуымен түсіндіріледі. Әсер режимдерінде көрсеткіштердің өзгеруі компоненттің табиғатына және әсер механизмінің басымдығына байланысты болды.

Нәтижелердің графикалық көрінісі 3-7-суреттерде келтірілген.



2-сурет. "Инфракар М-1.01" автомобиль 4-компонентті газ анализаторының көрсеткіштері

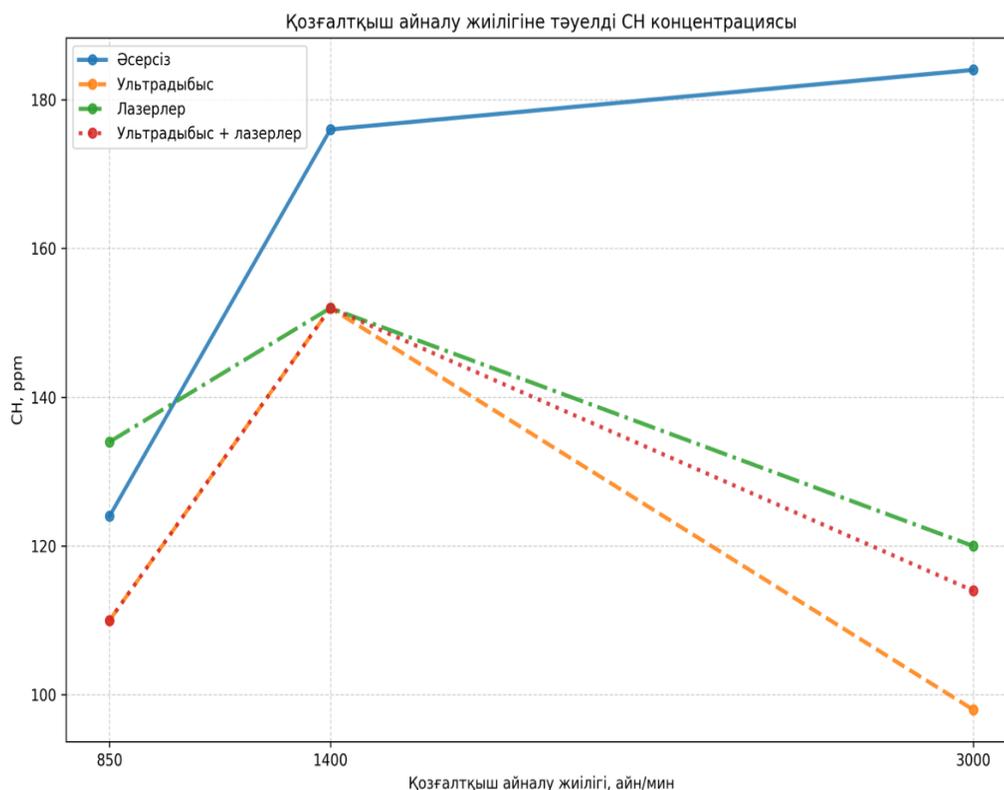
Төменде нәтижелерді компоненттер бойынша жеке талқылап, ықтимал механизмдермен байланыстырамыз. Сонымен қатар, алынған сандарды практикалық тұрғыдан интерпретациялау үшін салыстырмалы төмендеу пайыздары келтіріледі.

1-Кесте. Әртүрлі әсер режимдеріндегі шығарындылар газдарының құрамы

Кезең	Режим айн/мин	СН (ppm)	СО (%)	СО ₂ (%)	О ₂ (%)	Т газа (°С)	Ылғалд. (%)
Әсерсіз	850	124	2,48	9,56	5,87	37	39
Ультрадыбыс	850	110	2,39	9,56	6,17	37	39
Лазер	850	134	2,24	9,95	5,61	44	39
Біріктірілген	850	110	2,39	9,73	6,07	44	39
Әсерсіз	1400	176	2,74	9,85	5,2	49	39

Ультрадыбыс	1400	152	2,62	9,97	5,21	49	39
Лазер	1400	152	2,58	10,1	5,03	52	39
Біріктірілген	1400	152	2,62	9,97	5,21	52	39
Әсерсіз	3000	184	3,83	8,09	8,07	60	39
Ультрадыбыс	3000	98	1,5	9,5	5,68	60	39
Лазер	3000	120	2,24	9,95	11,94	60	39
Біріктірілген	3000	114	2,18	10,92	2,6	60	39

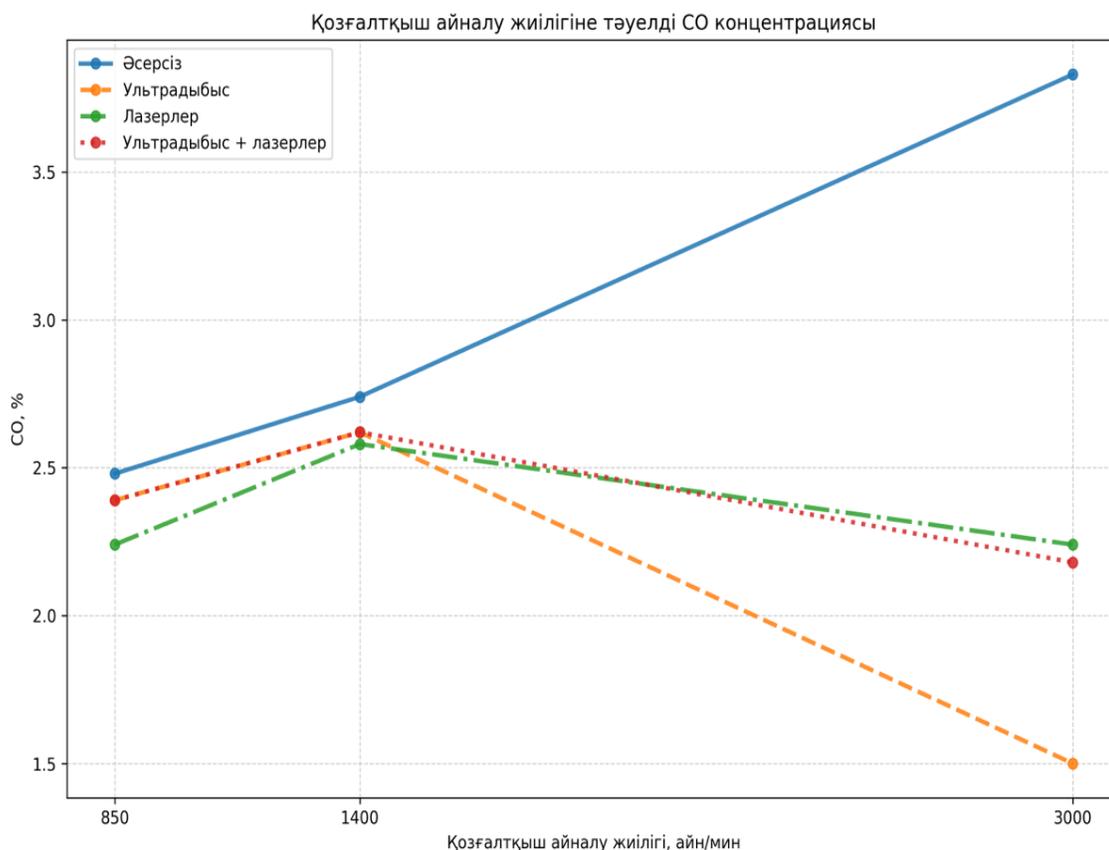
СН көрсеткіші жанудың толық еместігін және шығару жүйесіне түскен жанбай қалған көмірсутектердің мөлшерін сипаттайды. Бақылауда СН 850 айн/мин кезінде 124 ppm болып, 1400 айн/мин кезінде 176 ppm және 3000 айн/мин кезінде 184 ppm болды. 850 айн/мин кезінде ультрадыбыстық әсер СН-ты 110 ppm дейін төмендетіп, шамамен 11% төмендеу берді. Бұл ультрадыбыстың ағынды микродеңгейде араластыруы және радикалдық тотығуды күшейтуі арқылы түсіндірілуі мүмкін.



3-сурет. СН концентрациясының өзгеруі

Лазер әсері 850 айн/мин кезінде СН-ты 134 ppm дейін өсірді. Бұл құбылыс ауыр көмірсутектердің қысқа уақыт ішінде фрагментацияланып, газоанализаторда CH_4 эквиваленті ретінде тіркелетін жеңіл фракциялардың артуымен байланысты болуы ықтимал. Біріктірілген режимде 850 айн/мин кезінде СН қайтадан 110 ppm деңгейіне түсті, яғни бұл режимде ультрадыбыстың әсері басым болды.

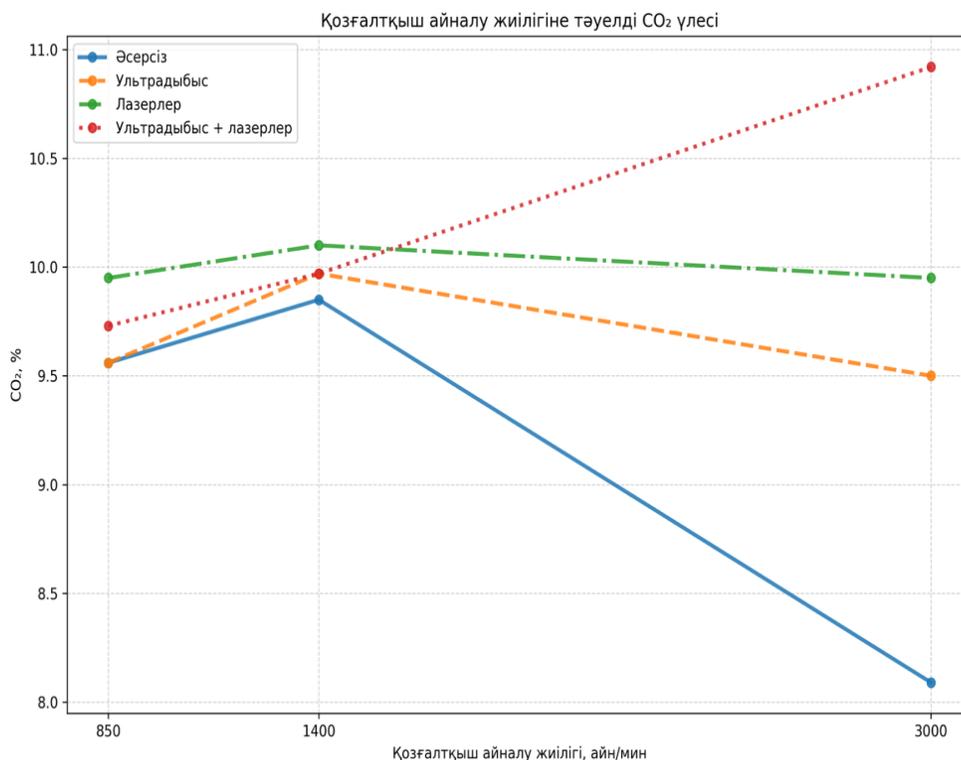
Іштен жану қозғалтқышының 1400 айн/мин кезінде ультрадыбыс, лазер және біріктірілген режимдердің барлығында СН 152 ppm деңгейіне төмендеді. Бұл шамамен 14% жақсару және қалалық режимге жақын айналымда технологияның тұрақты әсер ете алатынын көрсетеді. 3000 айн/мин кезінде лазер СН-ты 120 ppm дейін төмендетіп, 35% төмендеу берді, ал біріктірілген режим 114 ppm дейін төмендетіп, 38% шамасында нәтижеге жеткізді. Бұл жерде лазердің селективті әсері айқын көрінеді, ал ультрадыбыспен бірге қолдану ағын ішіндегі массалмасуды күшейтіп, фототермиялық және фотохимиялық әсердің «көлемдік» тиімділігін арттырған болуы ықтимал.



4-сурет. СО концентрациясының өзгеруі

СО көміртектің толық жанбауының негізгі индикаторларының бірі болып табылады және токсикологиялық тұрғыдан аса маңызды. 850 айн/мин кезінде бақылауда СО 2,48% болса, ультрадыбыс әсерінде 2,39% дейін төмендеп, шамамен 4% жақсару берді. Лазер әсері СО-ны 2,24% дейін төмендетіп, бос жүрісте лазердің ықпалы салыстырмалы түрде жоғары екенін көрсетті. 1400 айн/мин кезінде СО 2,74%-дан 2,58–2,62% аралығына түсті, бұл режимде екі әсердің ықпалы шамалы екенін байқатады.

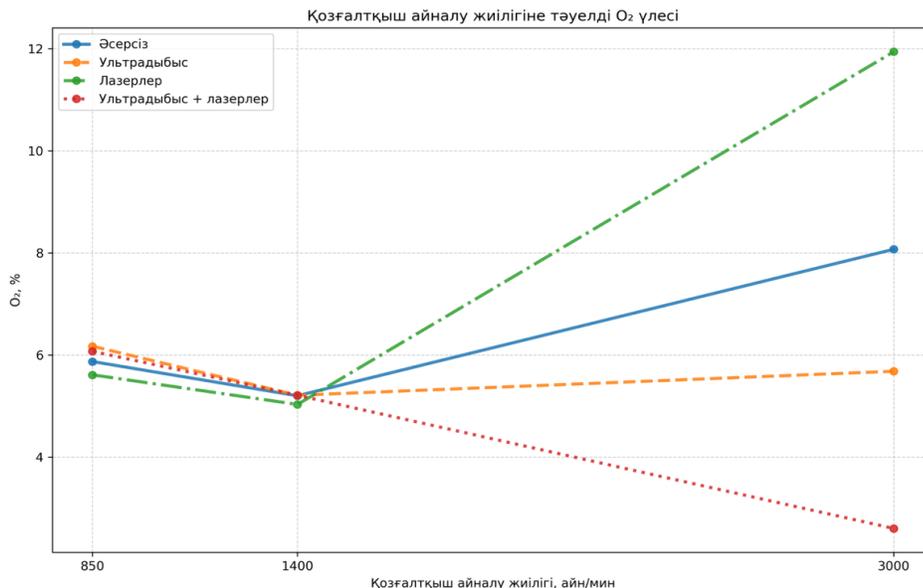
Ең күшті әсер 3000 айн/мин кезінде байқалды. Бақылауда CO 3,83% болды, ал ультрадыбыс әсерінде 1,50% дейін төмендеп, шамамен 61% төмендеу тіркелді. Мұндай айқын өзгеріс ультрадыбыстық өрістің CO тотығуын интенсификациялау әлеуетін көрсетеді. Мүмкін механизмдер ретінде ағынның турбуленттенуі, шекаралық қабаттардың бұзылуы, оттектен араласудың күшеюі және ультрадыбыстың қысым пульсациялары нәтижесінде реакция жылдамдығының артуы қарастырылады. Лазер 3000 айн/мин кезінде CO-ны 2,24% дейін төмендетіп, шамамен 42% төмендеу берді. Біріктірілген режимде CO 2,18% болды, яғни 43% төмендеу. Бұл мән ультрадыбыстың жеке режиміндегі ең төмен мәннен жоғары, алайда біріктірілген режимнің артықшылығы CO-мен қатар CN-ты да едәуір төмендетуімен анықталады. Сондықтан практикалық қолдануда екі компонентті бірге төмендету маңызды болған жағдайда біріктірілген режим тиімді компромисс ретінде қарастырылуы мүмкін. CO₂ жанудың толық өнімдерінің үлесін көрсетеді және CO мен CN тотығуы күшейген жағдайда CO₂ өседі. 850 және 1400 айн/мин кезінде CO₂ өзгерісі шағын болды: ультрадыбыс кезінде мәндер негізінен бақылауға жақын, лазер кезінде CO₂ аздап жоғарылады. 3000 айн/мин кезінде бақылауда CO₂ 8,09% болып, ультрадыбыспен 9,50% және лазермен 9,95% деңгейіне дейін көтерілді. Біріктірілген режимде CO₂ 10,92% дейін өсті, бұл жоғары айналымда жану процестерінің күшейгенін және көміртектік компоненттердің толық тотығуға ауысқанын көрсетеді.



5-сурет. CO₂ концентрациясының өзгеруі

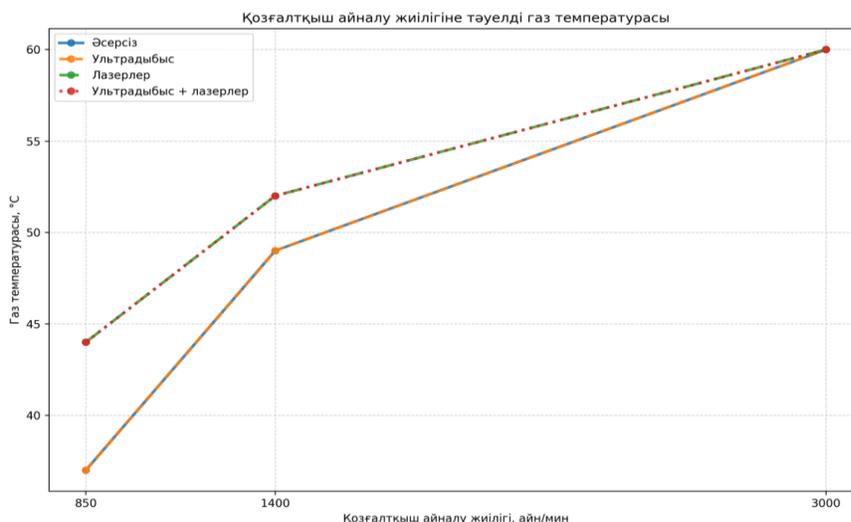
O₂ үлесінің өзгерісі жану мен кейінгі тотығудың ерекшелігін көрсетеді. 850 айн/мин кезінде O₂ 5,87%-дан ультрадыбыста 6,17% дейін көтерілді, бұл ағын құрылымының өзгеруі немесе жану тұрақтылығының аздап ауытқуы мүмкін екенін меңзейді. 1400 айн/мин кезінде айырмашылық өте аз 3000 айн/мин кезінде лазер әсерінде O₂ 11,94%

дейін өсуі байқалды; мұны жоғары айналымда лазердің жанама әсерінен қоспаның құрамы өзгеруімен немесе оттектің толық пайдаланылмай шығуы арқылы түсіндіруге болады.



6-сурет. O₂ концентрациясының өзгеруі

Біріктірілген режимде O₂ 2,60% дейін төмендеді, бұл оттектің СО және көмірсутектердің жануына неғұрлым толық жұмсалғанын көрсетеді. Нәтижелер жиынтығы біріктірілген әсерде тотығу реакцияларының жалпы қарқындылығы артатынын көрсетеді.



7-сурет. Эксперименттік гибриді қондырғының ішіндегі температураның өзгерісі мен қозғалтқыштың айналу жиілігінің тәуелділігі

Газ температурасы қозғалтқыш айналымы артқан сайын 37 °С-тан 60 °С-қа дейін өсті, бұл жылу бөлінуінің артуымен байланысты. Ультрадыбыстық әсер температураға айқын ықпал етпеді. Лазер әсерінде 850 және 1400 айн/мин кезінде температура 44–52 °С дейін

көтерілді. Бұл көрсеткіш дыбыс өшіргіштің көлемі бойынша орташа температура болғандықтан, лазер сәулесі бойындағы локальды аймақтарда бөлшектердің қызуы әлдеқайда жоғары болуы ықтимал; дәл осы локальды қызу беткі тотығуды күшейтетін факторлардың бірі ретінде қарастырылады. Салыстырмалы ылғалдылық барлық режимдерде шамамен 39% деңгейінде сақталды, бұл тәжірибе шарттарының тұрақты болғанын көрсетеді және кавитациялық әсерді салыстырмалы түрде бірдей ортада бағалауға мүмкіндік береді.

Статистикалық талдау және тиімділік көрсеткіштері

Өлшеулер бірнеше рет қайталанғандықтан, нәтижелердің тұрақтылығы вариация коэффициенті арқылы бағаланды. Газ компоненттері бойынша вариация коэффициенті әдетте 4–8% аралығында болды, бұл далалық стенд жағдайындағы өлшеулер үшін қабылдауға болатын деңгей. Температура бойынша шашырау 1% шамасында болды. Тиімділік көрсеткіштері бақылауға қатысты салыстырмалы төмендеу ретінде есептелді.

Мысалы, 3000 айн/мин кезінде СО үшін ультрадыбыстық режимдегі тиімділік $\eta_{CO} = (3,83 - 1,50) / 3,83 \times 100\% \approx 60,8\%$ құрады. Сол режимде лазер үшін $\eta_{CO} \approx 41,5\%$, ал біріктірілген режим үшін $\eta_{CO} \approx 43,1\%$. СН бойынша 3000 айн/мин кезінде лазер $\eta_{CH} \approx (184 - 120) / 184 \times 100\% \approx 34,8\%$, ал біріктірілген режим $\eta_{CH} \approx 38,0\%$ болды. Бұл есептер лазердің СН бойынша, ал ультрадыбыстың СО бойынша басым екенін сандық түрде растайды.

Қажет болған жағдайда 95% сенімділік интервалдары Стьюдент үлестірімі арқылы есептелді және негізгі айырмашылықтар өлшеу қателіктерінен жоғары деңгейде екенін көрсетті. Сонымен қатар, айналым мен концентрациялар арасындағы байланыстарды сапалық бағалау үшін Пирсон корреляциясы қолданылуы мүмкін; бақылауда СО айналыммен бірге өсетін тенденция көрсетсе, ультрадыбыстық режимде жоғары айналымда СО төмендеу бағытын көрсетті, бұл әсердің режимдік сипатын дәлелдейді [7].

Тазалау механизмдерінің физикалық интерпретациясы

Нәтижелерді түсіндіру үшін әсер механизмдері компоненттер бойынша қарастырылды. Ультрадыбыстық өріс қатты бөлшектерге акустикалық радиациялық күш түсіріп, олардың салыстырмалы жылдамдығын арттырады; бұл агломерацияға әкеледі. Іріленген бөлшектер тұнбаға оңай түседі және ағынның оптикалық тығыздығын төмендетеді. Сонымен бірге ультрадыбыс шекаралық қабаттарды бұзып, массалмасуды күшейтеді; бұл газ фазасындағы СО тотығу реакцияларының жылдамдығын арттыруы ықтимал. Кавитациялық әсер ылғал бар ортада радикалдардың пайда болуын күшейтіп, тотығу тізбекті реакцияларын жандандырады.

Инфрақызыл лазер сәулеленуі негізінен күйе бөлшектері арқылы жұтылып, фототермиялық қыздыруды туындатады. Қызған бөлшектер бетінде СО тотығуы және көмірсутектердің ыдырауы жүруі мүмкін. Фотодиссоциация механизмі инфрақызыл аймақта тікелей бірфотондық ыдыраудан гөрі көпфотондық жұтылу және термиялық әсер арқылы іске асуы ықтимал. Дәл осы себептен лазер әсері көмірсутектерге қатысты селективті көрінеді және жоғары айналымда СН айқын төмендеді.

Біріктірілген режимде ультрадыбыс ағынды араластырып, лазер энергиясының көлем бойынша таралуын жақсартады деп пайымдауға болады. Бұл СН бойынша синергиялық нәтижемен үйлеседі. СО бойынша синергия әрдайым байқалмауы мүмкін, өйткені СО тотығуы оттегі мөлшеріне, температураға және араласу уақытына сезімтал. Қондырғы

параметрлерін оңтайландыру арқылы (ультрадыбыс қуаты, сәуле жолы ұзындығы, лазер диодтарының орналасуы) СО және СН үшін бір мезгілде жоғары тиімділікке жетуге болады.

Ұсынылған әдістің маңызды артықшылығы – катализаторларды, адсорбенттерді немесе күрделі реагенттерді пайдаланбай, физикалық өрістер арқылы тазалау әсеріне қол жеткізу мүмкіндігі. Бұл экономикалық және экологиялық тұрғыдан тартымды, әсіресе техникалық қызмет көрсетуі қиын жағдайларда немесе ауыр техникада. Дегенмен тәжірибелік деректер бір ғана қозғалтқыш моделі мен шектеулі параметрлер жиынтығында алынғанын атап өткен жөн. Сондықтан қорытындыларды кең ауқымды паркке тарату үшін қосымша сынақтар қажет.

Шектеулердің бірі – NO_x және қатты бөлшектер (PM) бойынша кеңейтілген өлшеулердің бұл жұмыста толық қамтылмауы. Келесі зерттеулерде NO_x анализаторын, бөлшектер санын өлшейтін құралдарды және түтіндік көрсеткіштерді бір уақытта тіркеп, кешенді экологиялық әсерді бағалау ұсынылады. Сонымен қатар, энергия тұтыну мәселесі де маңызды. Ультрадыбыстық генератор мен лазер диодтарының қуаты салыстырмалы түрде төмен болғанымен, нақты көлікте үздіксіз қолдану кезінде электржүйеге түсетін жүктеме, жылулық режим және ұзақ мерзімді сенімділік есептелуі керек.

Қолданбалы тұрғыдан технологияны «ақылды» режимде басқару перспективалы: қозғалтқыш айналымына, жүктемесіне және газ құрамына қарай ультрадыбыс пен лазерді жеке немесе біріктіріп қосу арқылы тиімділікті арттыруға болады. Мысалы, жоғары айналымда СО төмендету үшін ультрадыбыс басым режимде, ал көмірсутектер көбейгенде лазер немесе біріктірілген режим іске қосылуы мүмкін. Мұндай басқару стратегиясы энергияны үнемдеп, тұрақты экологиялық әсер береді.

Шығарындыларды төмендетудің кең таралған тәсілі ретінде үшжолалы каталитикалық бейтараптандырғыштар СО мен көмірсутектерді СО₂ және Н₂О дейін тотығуға, ал NO_x-ты азотқа дейін тотықсыздануға бағыттайды. Бұл жүйелер тиімді болғанымен, асыл металдарға тәуелді, жұмыс температурасына сезімтал және отын қоспасының стехиометриясына қатаң талап қояды. Сонымен бірге техникалық қызмет көрсету, сапасыз отын және қысқа жүріс режимдері катализатордың улануына немесе толық қызбауына әкеліп, нақты тиімділікті төмендетеді. Сол себепті катализаторсыз немесе катализаторды толықтыратын белсенді физикалық әдістерге қызығушылық сақталады.

Қатты бөлшектерді ұстап қалуда күйе сүзгілер (DPF) кең қолданылады, бірақ оларда қарсы қысым өседі, регенерация қажеттілігі туады және пайдалану шығындары артады. Физикалық өрістерге негізделген әдістердің бір артықшылығы ағын құрылымын өзгерту арқылы бөлшектерді ірілендіру және тұндыру мүмкіндігі болып табылады. Ультрадыбыстық агломерация туралы жұмыстарда ылғалдылықтың рөлі, бөлшек өлшемдерінің таралуы және акустикалық өрістің интенсивтілігі негізгі факторлар ретінде қарастырылады. Біздің экспериментте ылғалдылық тұрақты ұсталғандықтан, ультрадыбыстың СО бойынша айқын әсері ең алдымен араласу мен тотығудың жеделдеуімен байланыстырылды, ал бөлшектердің нақты өлшемдік өзгерісін бағалау болашақта жеке міндет ретінде қарастырылады [8, 9].

Лазерлік және плазмалық технологиялар тұрғысынан шығарындыларды өңдеудің бір бағыты ретінде бейтарап емес плазма, сәулеленумен белсендіру және фотокаталитикалық қабаттар арқылы тотығу реакцияларын күшейту қарастырылады. Дегенмен мұндай

жүйелер әдетте күрделі, энергия тұтынуы жоғары немесе жоғары кернеу талап етеді. Инфрақызыл диодты лазерлердің артықшылығы олардың ықшамдылығы, басқарылуы және қауіпсіз қуат деңгейінде жұмыс істей алуы. Осы зерттеуде лазердің СН бойынша селективті әсері байқалып, инфрақызыл аймақта фототермиялық және көпфотондық әсерлердің ықтималдығы жанама түрде көрсетілді.

Қорытынды

Жүргізілген эксперименттік зерттеу іштен жану қозғалтқышының шығарындылар газдарының уыттылығын төмендетуде ультрадыбыстық және инфрақызыл лазерлік әсерлерді жеке және біріктіріп қолданудың тиімділігін көрсетті. Дыбыс өшіргіш корпусына интеграцияланған құрамдастырылған қондырғы бірдей қозғалтқыш және өлшеу шарттарында әртүрлі физикалық әсерлердің ықпалын сандық түрде салыстыруға мүмкіндік берді.

Нәтижелер ультрадыбыстық әсердің, әсіресе жоғары айналым режимінде (3000 айн/мин), көміртек тотығының (СО) концентрациясын айқын төмендететінін дәлелдеді: СО мөлшері бақылаумен салыстырғанда шамамен 60–61% азайды. Бұл ультрадыбыстың ағынды турбуленттендіруі, массалмасуды күшейтуі және тотығу реакцияларын интенсификациялауымен түсіндіріледі. Инфрақызыл лазерлік сәулелену жанбай қалған көмірсутектерге (СН) қатысты селективті әсер көрсетіп, жоғары айналымда СН концентрациясын 35%-ға дейін төмендетті, бұл фототермиялық қыздыру және көмірсутектердің ыдырау механизмдерімен байланысты.

Ультрадыбыстық және лазерлік әсерлерді біріктіріп қолдану шығарындыларды кешенді түрде төмендетуге мүмкіндік берді: 3000 айн/мин кезінде СН шамамен 38%, ал СО шамамен 43% азайды. Сонымен қатар, СО₂ үлесінің артуы және О₂ концентрациясының төмендеуі жану және кейінгі тотығу процестерінің күшейгенін, яғни жану өнімдерінің неғұрлым толық өңделгенін көрсетті. Бұл біріктірілген режимде әртүрлі физикалық механизмдердің (акустикалық агломерация, кавитациялық тотығу, фототермиялық және фотохимиялық әсерлер) бірін-бірі толықтырып, синергиялық нәтиже беретінін растайды.

Зерттеудің ғылыми жаңалығы ультрадыбыстық сәулелендіргіш пен инфрақызыл лазер диодтарын бір дыбыс өшіргіш корпусына біріктіретін конструкциялық шешімді ұсынуда және төрт әсер режимін бірдей әдістемемен салыстыратын эксперименттік деректерді алуда көрініс тапты. Практикалық тұрғыдан алынған нәтижелер каталитикалық материалдарды қолданбай-ақ, физикалық өрістер арқылы шығарындыларды төмендетудің баламалы және перспективалы бағытын көрсетеді.

Мүдделер қақтығысы

Авторлар осы зерттеуге қатысты ешқандай мүдделер қақтығысының жоқ екенін мәлімдейді.

Авторлардың қосқан үлесі

М.С. Исабаев – қолжазба мәтінін жазу, зерттеу әдістемесін әзірлеу, эксперименттік зерттеудің дизайнын әзірлеу, эксперименттік деректерді талдау және жүйелеу.

Б.К. Сарсембеков – қолжазба мәтінін жазу, зерттеу әдістемесін әзірлеу, эксперименттік зерттеудің дизайнын әзірлеу.

Н.Б. Жаркенов – әдеби деректерді талдау және жинақтау.

А.Т. Умбетжанова – графикалық материалдармен жұмыс.

Е.К. Сарсембеков – қолжазба мәтінін жазу, қорытындыларды тұжырымдау.

Әдебиеттер тізімі

1. Sarsembekov, B.K.; Kadyrov, A.S.; Kunayev, V.A.; Issabayev, M.S.; Kukesheva, A.B. Experimental Comparison of Methods for Cleaning Car Exhaust Gas by Exposure Using Ultrasound and Laser Radiation. *Mater. Mech. Eng. Technol.* 2024, 3. https://doi.org/10.52209/2706-977X_2024_3_44. - ағылшын тіліндегі журнал
2. Raj, B.; Rajendran, V.; Palanichamy, P. *Science and Technology of Ultrasonics*; Alpha Science International: Oxford, UK, 2004; ISBN 978-1-84265-066-0. - ағылшын тіліндегі журнал
3. Özyalcin, C.; Sterlepper, S.; Roiser, S.; Eichlseder, H.; Pischinger, S. Exhaust gas aftertreatment to minimize NOX emissions from hydrogen-fueled internal combustion engines. *Appl. Energy* 2024, 353, 122045. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.122045>. - ағылшын тіліндегі журнал
4. Sinha, D.N. *Gas Separation Using Ultrasound and Light Absorption*; Triad National Security, LLC: Los Alamos, New Mexico, 2010. - ағылшын тіліндегі журнал
5. Fujii, T. Decomposition Method for Nitrogen Oxide in Gas Mixture Containing Nitrogen Oxide. Patent JPS63267423A, 4 November 1988. Available online: <https://patents.google.com/patent/JPS63267423A/en?q=Patent+JPS63267423A> (accessed on 12 January 2026). - патент
6. Khmelev, V.N.; Shalunov, A.V.; Golykh, R.N. Increasing the Efficiency of Coagulation of Submicron Particles under Ultrasonic Action. *Theor. Found. Chem. Eng.* 2020, 54, 539–550. <https://doi.org/10.1134/S0040579520030069>. - ағылшын тіліндегі журнал
7. Kumar, A. Three-Way Catalyst (TWC): The Key to Cleaner Gasoline Engine Emissions. LinkedIn Pulse. 2025. Available online: <https://www.linkedin.com/pulse/three-way-catalyst-twc-key-cleaner-gasoline-engine-emissions-kumar-ady0c> (accessed on 12 January 2026). - ағылшын тіліндегі журнал
8. Khoa, N.X.; Lim, O. A Review of the External and Internal Residual Exhaust Gas in the Internal Combustion Engine. *Energies* 2022, 15, 1208. <https://doi.org/10.3390/en15031208>. - ағылшын тіліндегі журнал
9. Lu, C.; Chen, W.; Zuo, Q.; Zhu, G.; Zhang, Y.; Liu, Z. Review of Combustion Performance Improvement and Nitrogen-Containing Pollutant Control in the Pure Hydrogen Internal Combustion Engine. *Int. J. Automot. Manuf. Mater.* 2022, 1, 7. <https://doi.org/10.53941/ijamm0101007>. - ағылшын тіліндегі журнал
10. Shamim, T. Effect of engine exhaust gas modulation on the cold start emissions. *Int. J. Automot. Technol.* 2011, 12, 475–487. <https://doi.org/10.1007/s12239-011-0056-2>.
11. Edmonds, P.D.; Sancier, K.M. Evidence for free radical production by ultrasonic cavitation in biological media. *Ultrasound Med. Biol.* 1983, 9, 635–639. [https://doi.org/10.1016/0301-5629\(83\)90009-1](https://doi.org/10.1016/0301-5629(83)90009-1).
12. Kang, I.-S.; Xi, J.; Hu, H.-Y. Photolysis and photooxidation of typical gaseous VOCs by UV Irradiation: Removal performance and mechanisms. *Front. Environ. Sci. Eng.* 2018, 12, 8. <https://doi.org/10.1007/s11783-018-1032-0>.

13. Liu, J.; Wang, J.; Zhang, G.; Zhou, J.; Cen, K. Frequency comparative study of coal-fired fly ash acoustic agglomeration. *J. Environ. Sci.* 2011, 23, 1845–1851. [https://doi.org/10.1016/s1001-0742\(10\)60652-3](https://doi.org/10.1016/s1001-0742(10)60652-3).
14. Mazyan, W.I.; Ahmadi, A.; Ahmed, H.; Hoorfar, M. Increasing efficiency of natural gas cyclones through addition of tangential chambers. *J. Aerosol Sci.* 2017, 110, 36–42. <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2017.05.007>.
15. Gallego-Juarez, J.A.; Graff, K.F. *Power Ultrasonics: Applications of High-Intensity Ultrasound*; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2014.
16. Bergmann, L. *Der Ultraschall und Seine Anwendung in Wissenschaft und Technik*; S. Hirzel: Stuttgart, Germany, 1954.
17. Sarsembekov, B.; Issabayev, M.; Zharkenov, N.; Kaukarov, A.; Utebayev, I.; Murzagaliyev, A.; Zhamanbayev, B. Ultrasonic–Laser Hybrid Treatment for Cleaning Gasoline Engine Exhaust: An Experimental Study. *Vehicles* 2026, 8, 22. <https://doi.org/10.3390/vehicles8010022>. - ағылшын тіліндегі журнал

**М.С. Исабаев¹, Б.К. Сарсембеков^{*1}, Н.Б. Жаркенов¹,
А.Т. Умбетжанова¹, Е.К. Сарсембеков²**

¹*Қарағандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, Караганда, Казахстан*

²*АО «Пассажирские перевозки», Астана, Казахстан*

Экспериментальное исследование очистки выхлопных газов бензиновых двигателей при комбинированном воздействии ультразвука и лазерного излучения

Аннотация. В данной работе представлено экспериментальное исследование, направленное на снижение токсичности выхлопных газов двигателей внутреннего сгорания с использованием ультразвуковых волн и инфракрасного лазерного излучения. Разработана и испытана оригинальная комбинированная установка, объединяющая ультразвуковой излучатель и инфракрасный лазер, размещённые в корпусе автомобильного глушителя. В режиме без воздействия, ультразвукового воздействия, лазерного воздействия и их комбинированном применении были измерены концентрации основных компонентов выхлопных газов (несгоревшие углеводороды СН, оксид углерода СО, диоксид углерода СО₂, кислород О₂), а также температура газа при работе двигателя на холостом ходу и при повышенных оборотах. По отдельности данные воздействия оказывают селективное влияние на различные компоненты: ультразвук снижает концентрацию СО до 60% по сравнению с контрольным режимом при повышенных оборотах, лазерное излучение уменьшает концентрацию СН на 35–40 %. Совместное применение обеспечивает комплексное снижение концентрации вредных веществ (уменьшение СН и СО соответственно до 38 % и 43 %). Одновременно наблюдается снижение содержания О₂ и увеличение доли СО₂, что свидетельствует о более эффективном сгорании топлива и удержании продуктов реакции. Полученные результаты подтверждают перспективность комплексного применения ультразвука и инфракрасных лазеров для очистки выхлопных газов.

Ключевые слова: очистка выхлопных газов, ультразвуковая очистка, инфракрасный лазер, акустическая коагуляция, фотодиссоциация, токсичные выбросы

M.S. Issabayev¹, B.K. Sarsembekov^{*1}, N.B. Zharkenov¹, A.T. Umbetzhanova¹, Y.K. Sarsembekov²

¹*Abylkas Saginov Karaganda Technical University, Karaganda, Kazakhstan;*

²*JSC "Passenger Transportation", Astana, Kazakhstan*

Experimental Study of Exhaust Gas Purification from a Gasoline Engine under Combined Ultrasonic and Laser Radiation Effects

Abstract. This paper presents an experimental study aimed at reducing the toxicity of internal combustion engine exhaust gases using ultrasonic waves and infrared laser radiation. An original combined device integrating an ultrasonic emitter and an infrared laser into the housing of an automobile muffler was developed and tested. Under no-treatment conditions, as well as under ultrasonic, laser, and combined exposure, the concentrations of the main exhaust gas components, including unburned hydrocarbons (CH), carbon monoxide (CO), carbon dioxide (CO₂), and oxygen (O₂), together with gas temperature, were measured at engine idle and at increased engine speeds. The results showed that ultrasound and laser radiation exert selective effects on different exhaust components. At higher engine speeds, ultrasonic treatment reduced CO concentration by up to 60% compared with the control mode, whereas laser radiation decreased CH concentration by 35–40%. Their combined application provided a complex reduction in harmful emissions, with CH and CO decreasing by 38% and 43%, respectively. The findings confirm the potential of the integrated use of ultrasound and infrared lasers for exhaust gas purification.

Keywords: Exhaust gas cleaning, ultrasonic cleaning, infrared laser, acoustic coagulation, photodissociation, toxic emissions

References

1. Sarsembekov, B.K.; Kadyrov, A.S.; Kunayev, V.A.; Issabayev, M.S.; Kukesheva, A.B. Experimental Comparison of Methods for Cleaning Car Exhaust Gas by Exposure Using Ultrasound and Laser Radiation. *Mater. Mech. Eng. Technol.* 2024, 3. https://doi.org/10.52209/2706-977X_2024_3_44. - English language magazine
2. Raj, B.; Rajendran, V.; Palanichamy, P. *Science and Technology of Ultrasonics*; Alpha Science International: Oxford, UK, 2004; ISBN 978-1-84265-066-0. - English language magazine
3. Özyalcin, C.; Sterlepper, S.; Roiser, S.; Eichlseder, H.; Pischinger, S. Exhaust gas aftertreatment to minimize NOX emissions from hydrogen-fueled internal combustion engines. *Appl. Energy* 2024, 353, 122045. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.122045>. - English language magazine
4. Sinha, D.N. *Gas Separation Using Ultrasound and Light Absorption*; Triad National Security, LLC: Los Alamos, New Mexico, 2010. - English language magazine
5. Fujii, T. Decomposition Method for Nitrogen Oxide in Gas Mixture Containing Nitrogen Oxide. Patent JPS63267423A, 4 November 1988. Available online:

- <https://patents.google.com/patent/JPS63267423A/en?q=Patent+JPS63267423A> (accessed on 12 January 2026). - Patent
6. Khmelev, V.N.; Shalunov, A.V.; Golykh, R.N. Increasing the Efficiency of Coagulation of Submicron Particles under Ultrasonic Action. *Theor. Found. Chem. Eng.* 2020, 54, 539–550. <https://doi.org/10.1134/S0040579520030069>. - English language magazine
 7. Kumar, A. Three-Way Catalyst (TWC): The Key to Cleaner Gasoline Engine Emissions. LinkedIn Pulse. 2025. Available online: <https://www.linkedin.com/pulse/three-way-catalyst-twc-key-cleaner-gasoline-engine-emissions-kumar-ady0c> (accessed on 12 January 2026).
 8. Khoa, N.X.; Lim, O. A Review of the External and Internal Residual Exhaust Gas in the Internal Combustion Engine. *Energies* 2022, 15, 1208. <https://doi.org/10.3390/en15031208>. - English language magazine
 9. Lu, C.; Chen, W.; Zuo, Q.; Zhu, G.; Zhang, Y.; Liu, Z. Review of Combustion Performance Improvement and Nitrogen-Containing Pollutant Control in the Pure Hydrogen Internal Combustion Engine. *Int. J. Automot. Manuf. Mater.* 2022, 1, 7. <https://doi.org/10.53941/ijamm0101007>. - English language magazine
 10. Shamim, T. Effect of engine exhaust gas modulation on the cold start emissions. *Int. J. Automot. Technol.* 2011, 12, 475–487. <https://doi.org/10.1007/s12239-011-0056-2>.
 11. Edmonds, P.D.; Sancier, K.M. Evidence for free radical production by ultrasonic cavitation in biological media. *Ultrasound Med. Biol.* 1983, 9, 635–639. [https://doi.org/10.1016/0301-5629\(83\)90009-1](https://doi.org/10.1016/0301-5629(83)90009-1).
 12. Kang, I.-S.; Xi, J.; Hu, H.-Y. Photolysis and photooxidation of typical gaseous VOCs by UV Irradiation: Removal performance and mechanisms. *Front. Environ. Sci. Eng.* 2018, 12, 8. <https://doi.org/10.1007/s11783-018-1032-0>.
 13. Liu, J.; Wang, J.; Zhang, G.; Zhou, J.; Cen, K. Frequency comparative study of coal-fired fly ash acoustic agglomeration. *J. Environ. Sci.* 2011, 23, 1845–1851. [https://doi.org/10.1016/s1001-0742\(10\)60652-3](https://doi.org/10.1016/s1001-0742(10)60652-3).
 14. Mazyan, W.I.; Ahmadi, A.; Ahmed, H.; Hoorfar, M. Increasing efficiency of natural gas cyclones through addition of tangential chambers. *J. Aerosol Sci.* 2017, 110, 36–42. <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2017.05.007>.
 15. Gallego-Juarez, J.A.; Graff, K.F. *Power Ultrasonics: Applications of High-Intensity Ultrasound*; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2014.
 16. Bergmann, L. *Der Ultraschall und Seine Anwendung in Wissenschaft und Technik*; S. Hirzel: Stuttgart, Germany, 1954.
 17. Sarsembekov, B.; Issabayev, M.; Zharkenov, N.; Kaukarov, A.; Utebayev, I.; Murzagaliyev, A.; Zhamanbayev, B. Ultrasonic–Laser Hybrid Treatment for Cleaning Gasoline Engine Exhaust: An Experimental Study. *Vehicles* 2026, 8, 22. <https://doi.org/10.3390/vehicles8010022>. - English language magazine

Авторлар туралы мәлімет:

Исабаев М.С. – 8D07102 «Көлік, көлік техникасы және технологиялары» білім беру бағдарламасының докторанты, «Көлік техникасы және логистикалық жүйелер» кафедрасы, Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Нұрсұлтан Назарбаев көш., 56, Бірінші ғимарат, 100027, Қарағанды, Қазақстан

Сарсембеков Б.К. – Ph.D., хат-хабар үшін автор, ассистент-профессор, «Көлік техникасы және логистикалық жүйелер» кафедрасы, Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Нұрсұлтан Назарбаев көш., 56, Бірінші ғимарат, 100027, Қарағанды, Қазақстан

Жаркенов Н.Б. – Ph.D., қауымдастырылған профессор (доцент), кафедра меңгерушісі, «Көлік техникасы және логистикалық жүйелер» кафедрасы, Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Нұрсұлтан Назарбаев көш., 56, Бірінші ғимарат, 100027, Қарағанды, Қазақстан

Умбетжанова А.Т. – аға оқытушы, «Көлік техникасы және логистикалық жүйелер» кафедрасы, Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Нұрсұлтан Назарбаев көш., 56, Бірінші ғимарат, 100027, Қарағанды, Қазақстан

Сарсембеков Е.К. – жетекші инженер, «Жолаушылар тасымалы» АҚ «Солтүстік» аймақтық жолаушылар тасымалы филиалы, Мұхамеджан Тынышпаев көш., 8, Алматы ауданы, 010000, Астана, Қазақстан

Исабаев М.С. – докторант кафедрасы «Транспортная техника и логистические системы», образовательная программа 8D07102 «Транспорт, транспортное техника и технологии», Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, проспект Н. Назарбаева, 56, 100027, Караганда, Казахстан

Сарсембеков Б.К. – PhD, автор для корреспонденции, ассистент профессора кафедрасы «Транспортная техника и логистические системы», Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, проспект Н. Назарбаева, 56, 100027, Караганда, Казахстан

Жаркенов Н.Б. – PhD, ассоциированный профессор (доцент) кафедрасы «Транспортная техника и логистические системы», заведующий кафедрой, Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, проспект Н. Назарбаева, 56, 100027, Караганда, Казахстан

Умбетжанова А.Т. – старший преподаватель кафедрасы «Транспортная техника и логистические системы», Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, проспект Н. Назарбаева, 56, 100027, Караганда, Казахстан,

Сарсембеков Е.К. – ведущий инженер сектора по сервисному обслуживанию регионального филиала по пассажирским перевозкам «Северный» АО «Пассажирские перевозки», ул. Мухамеджана Тынышпаева, 8, 010000, Астана, Казахстан

Issabayev M.S. – NJSC "Abylkas Saginov Karaganda Technical University", doctoral student of the educational program 8D07102 "Transport, transport equipment and technology", Department of "Transport Technology and Logistics Systems", Nursultan Nazarbayev Avenue, 56 - Building 1, 100027, Karaganda, Kazakhstan.

Sarsembekov B.K. – PhD, Corresponding Author, Assistant Professor, Department of Transport Engineering and Logistics Systems, NJSC "Abylkas Saginov Karaganda Technical University", 56 Nursultan Nazarbayev Avenue, Academic Building No. 1, 100027, Karaganda, Kazakhstan.

Zharkenov N.B. – PhD, Associate Professor (Docent), Department of Transport Engineering

and Logistics Systems, Head of the Department, NJSC "Abylkas Saginov Karaganda Technical University", 56 Nursultan Nazarbayev Avenue, Academic Building No. 1, 100027, Karaganda, Kazakhstan.

Umbetzhanova A.T. – Senior Lecturer, Department of Transport Engineering and Logistics Systems, NJSC "Abylkas Saginov Karaganda Technical University", 56 Nursultan Nazarbayev Avenue, Academic Building No. 1, 100027, Karaganda, Kazakhstan.

Sarsembekov E.K. – Lead Engineer, Service Maintenance Sector, "Northern" Regional Branch for Passenger Transportation, JSC "Passenger Transportation", 8 Mukhamedzhan Tynyshpaev Street (Almaty District), 010000, Kazakhstan.



Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/>)



ХҒТАР 55.30.03
Ғылыми мақала

<https://doi.org/10.32523/2616-7263-2026-154-203-215>

Жер қазу машиналарының жұмыс органдарының морфологиялық талдауы және қозғалыс динамикасын математикалық модельдеу

Ж.Ж. Жунусбекова 

«Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті» КеАҚ

E mail: zh.zhunusbekova@ktu.edu.kz

Аңдатпа. Бұл мақалада жол және құрылыс саласында кеңінен қолданылатын жер қазу машиналарының жаңа түрлерін және жұмыс органдарын жетілдірудің ғылыми-әдістемелік негіздері қарастырылған. Қазақстандағы құрылыс көлемінің қарқынды өсуі жер қазу үрдістерін механикаландыру және олардың тиімділігін арттыру қажеттілігін туындатады. Жер қазу машиналарының өзектілігі жол, көлік, су шаруашылығы, гидротехникалық, өнеркәсіптік, азаматтық және ауыл шаруашылығы объектілерін салуға байланысты әртүрлі салаларда кеңінен қолдануға негізделген. Осы мақсатта жер қазу машиналарының жұмыс органдарын морфологиялық талдау және олардың қозғалысын математикалық модельдеу әдістері ұсынылды. Зерттеу барысында топырақты бұзу тәсілдері, жұмыс ортасы, тасымалдау әдістері, жұмыс циклы және базалық машинаға ілу түрлері бойынша жіктелім жүргізіліп, жұмыс органдарының гипотетикалық құрылымдарының көптүрлілігі анықталды. Морфологиялық ағаш негізінде 484 мүмкін жұмыс органы нұсқасы алынды. Әр түрлі орта жағдайында жұмыс органдары қозғалысының төрт математикалық блогы әзірленіп, кесу мен тасымалдауға қарсы кедергі күштері ескерілді. Жасалған модельдер жер қазу үрдісінің энергия шығындарын азайтуға, беріліс күші мен айналу жиілігін оңтайландыруға, сондай-ақ машиналардың меншікті энергия сыйымдылығын төмендетуге мүмкіндік береді. Алынған нәтижелер жол-құрылыс техникасын жобалау мен жетілдіруде практикалық маңызға ие. **Түйін сөздер:** жер қазу машиналары, жұмыс органдары, топырақты кесу, орта, кедергі күштер, математикалық модель, жұмыс режимі.

Түсті 11.11.2025. Жөнделді 21.11.2025. Мақұлданды 30.11.2025. Онлайн қолжетімді 30.03.2026

* хат-хабар үшін автор

Кіріспе

Қазақстанда құрылыстың дамуы заманауи инфрақұрылымды құруда және өмір сүру сапасын жақсартуда стратегиялық рөл атқарады. Бұл сала жаңа жұмыс орындарын құрып қана қоймай, сонымен қатар халықты тұрғын үймен қамтамасыз етеді, қалалық ортаны жайлы етеді. Сонымен қатар, белсенді үкіметтік саясаттың және жеке құрылыс салушылардың қатысуының арқасында жыл сайын миллиондаған шаршы метр тұрғын үй, мектептер, ауруханалар және әлеуметтік нысандар салынады. Құрылыс саласы белсенді дамып келеді — тұрғын үйлер, өндірістік нысандар, көлік және инженерлік инфрақұрылымдар көптеп салынуда. 2025 жылғы қаңтар-тамызда Қазақстанда құрылыс жұмыстарының көлемі 18,1% -ға өсіп, 4,8 трлн теңгеден асты. Қазақстанның ресми статистикасына сәйкес, аяқталған жұмыстардың ең үлкен үлесі келесіге тиесілі: автожол, теміржол және метро құрылысы – 23,9%, тұрғын емес ғимараттар құрылысы – 21,9%, тұрғын үй құрылысы – 13,4%.

Құрылыс көлемінің өсуі елдің 18 аймағында байқалды. Ең үлкен өсім:

Қостанай облысы – +40,4%, Қызылорда облысы – +37%, Түркістан облысы – +34,6%,

Солтүстік Қазақстан облысы – +34,2%, Батыс Қазақстан облысы – +33,4%, Ақмола облысы – +32,7%, Алматы (+35,6%), Астана (+33,9%) және Шымкент (+18,8%) қалалары. Бұл туралы Ұлттық статистика бюросында хабарлады [1]. Құрылыс жұмыстарының физикалық көлемінің индексі 1-суретте көрсетілген. Ғимараттар мен үймереттердің құрылысы күрделі технологиялық үрдіс болып табылады, оның құрамдас бөліктерінің бірі топырақ жұмыстарын өңдеу болып табылады. Бұл жағдай жер жұмыстарының көлемін арттырып, оларды механикаландыру қажеттілігін күшейтті. Сол себепті жер қазу машиналарының маңызы ерекше артып отыр. Құрылыс көлемінің артуы мен сонымен қатар жұмсалатын ресурстардың азаюы, яғни құрылысты **қарқындату**, жалпы технологиялық үдерістің сапасын арттыру есебінен, сондай-ақ оның жекелеген операцияларын жетілдіру арқылы да жүзеге асуы мүмкін. Жер қазу жұмыстарына бейімделген базалық машиналарды сатып алу өте қымбатқа түседі. Сондықтан экономикалық тұрғыдан алғанда, Қазақстан кәсіпорындарында бар базалық машиналарға орнатылатын аспалы жұмыс органдарын әзірлеу орынды шешім болып табылады. Бұл тәсіл құрылыс тиімділігін арттырып қана қоймай, капиталдық салымдарды азайту есебінен жобалардың өзіндік құнын төмендетуге мүмкіндік береді.



1-сурет. 2024-2025 жылдарда еліміздегі құрылыстың физикалық көлемінің индекстері

Жер қазу жұмыстарына бейімделген базалық машиналарды сатып алу өте қымбатқа түседі. Сондықтан экономикалық тұрғыдан алғанда, Қазақстан кәсіпорындарында бар базалық машиналарға орнатылатын аспалы жұмыс органдарын әзірлеу орынды шешім болып табылады. Бұл тәсіл құрылыс тиімділігін арттырып қана қоймай, капиталдық салымдарды азайту есебінен жобалардың өзіндік құнын төмендетуге мүмкіндік береді.

Жер жұмыстары ғимараттар мен үймереттерді тұрғызудың нөлдік цикліне жататын негізгі әрі жауапты кезең болып саналады. Бұл жұмыстарды орындау жер қазу, жер қазу-тасымалдау машиналары мен механизмдерін, сондай-ақ көлік құралдарын кешенді түрде таңдап, тиімді пайдалану қажеттігін туындатады.

Жер қазу машинасы осы әдіспен жүргізілетін құрылыс технологиялық үдерісінің негізгі буыны болып табылады және сол үдерістің техникалық әрі экономикалық көрсеткіштерін айқындайды. Алайда құрылыс жағдайларының әр алуандығына байланысты кей жағдайларда нақты телімдерде немесе жоба ерекшеліктеріне бейімделген жаңа жер қазу машинасын жасау экономикалық тұрғыдан тиімді болып табылады [2].

Әдіснама

Құрылыста қолданылатын машиналардың бірнеше түрі бар. Алайда құрылыс жағдайларының алуан түрлілігі соншалық, кейде нақты жағдайларға арнап жаңа жер қазатын машинаны жасау экономикалық тұрғыдан тиімді болып табылады. Жер қазатын машинаның құрылысы негізінен оның жұмыс органының түрімен анықталады [3]. Басқаша айтқанда, жер қазатын машинаның құрылымын анықтауда басты рөлді жұмыс органы атқарады – бұл белгілі бір бұйымдар жиынының класы ретінде параметрлер жүйесімен сипатталатын абстракция болып табылады.

Жұмыс органы параметрлерінің (сипаттамаларының) жиынтығы бұйымды жобалау мен дайындауға қажетті әрі жеткілікті шарттарды білдіреді. Бұл параметрлер жиынтығы қойылған мақсатқа сәйкес мүмкін болатын көптеген нұсқалардың ішінен таңдалып алынады. Машинаның белгілі бір құрылымын, құрылымдық түрін немесе класын нақты бір параметрлер жиынтығы бірімәнді түрде анықтайды [4].

Ұсынылып отырған әдістің мәні – жер қазатын машиналардың жұмыс органдарының гипотетикалық құрылымдарын динамикалық морфологиялық талдау әдісі арқылы болжау, жұмыс органы қозғалысының динамикасын математикалық модельдеу және оның параметрлерін анықтау болып табылады.

Әдісті пайдалана отырып, мақсатқа жету үшін келесі тізбектілікті қолдану қажет: жіктелімдік белгілерін анықтау; жұмыс органдарының қозғалыс траекторияларын орнату; жұмыс органдарының гипотетикалық құрылымдарының көптігін анықтау; жұмыс органдарының жүктелуін ескеру; оңтайлылық критериесін негіздеу; жұмыстың математикалық үлгісін әзірлеу және зерттеу.

Жіктелімдік белгі ретінде келесілер қабылданды:

1. Топырақты бұзу тәсілі:

- механикалық; гидромеханикалық және и ағындық. Гидромеханикалық тәсіл жұмыс мүшесінің кескіші топырақтың беріктігі өскенде қосылатын шүмекпен

жабдықталғандығын білдіреді [5]. Ағындық топырақты жоғары қысымдағы ағынмен бұзуды білдіреді [5].

2. Инструменттің қозғалыс траекториясы.

3. Қызмет ету ортасы: сұйық (сазды ерітінді, су); ауа.

4. Бұзылған топырақты тасымалдау тәсілі: механикалық (шнек, шөміш, винт, элеватор); гидравликалық (топырақты сорғы немесе эрлифт).

5. Жұмыс циклы: үздіксіз, позиционды, циклдық.

6. Жұмыс мүшесін базалық машинаға ілу: қатаң, иілмелі.

Топырақты бұзу тәсілдері морфологиялық ағашта жұмыс мүшелерінің үш нұсқасын береді.

Басты жіктелімдік белгісіне жұмыс мүшесінің қозғалыс траекториясы жатады. Оны морфологиялық кестеге енгізсек онда морфологиялық сараптаманы динамикалық болжау әдіспен жасауға мүмкін болады.

Жүктеу сипатының ортақтылығы бойынша траекториялар үш топқа бөлінеді.

Бірінші топқа ілгерілемелі қозғалыстағы траекториялар кіреді. Екінші топқа ілгерілемелі және бір айналмалы қозғалысқа ие болатын траекториялар жатады. Үшінші топқа ілгерілемелі және екі айналмалы қозғалысқа ие болатын траекториялар жатады.

Элементарлық қозғалыстардың саны (еркіндік дәрежелері) жұмыс органының жетегін жобалау кезінде қажетті ақпарат болып табылады. Әрбір элементарлық қозғалыс жеке немесе ортақ жетек пен белгілі бір трансмиссия арқылы жүзеге асырылуы мүмкін.

Кейбір жұмыс органдары екі немесе бірнеше жеке элементтерден тұрады. Мысалы, екі иінді машиналар, көпшөмішті экскаваторлар және т.б. Мұндай машиналардың жұмыс органдары элементтерінің қозғалыс траекториялары көбіне бірдей немесе симметриялы болады. Симметриялық реактивті моменттердің өзара теңгерілуіне мүмкіндік береді. Сондықтан жұмыс органының жүктемесін талдау кезінде оның қозғалысы екі симметриялы немесе бірнеше бірдей траекториялар бойымен жүзеге асуы мүмкін екенін ескеру қажет.

Алдын ала жүргізілген талдау нәтижесінде траекториялардың келесі топтары анықталады:

– бірінші топқа экскаваторлар мен драглайнды скреперлердің жұмыс органдары жатады;

– екінші топқа бұрғылау және фрезерлеу машиналары, сондай-ақ дискілі саңылауқазғыштар кіреді;

– үшінші топқа екі элементарлы айналу қозғалысы бар құралдармен жабдықталған машиналар, мысалы, мұнай немесе газ ұңғымаларын бұрғылауда қолданылатын шарошқалар жатады [6].

Барлық осы машиналарды біріктіретін ортақ ерекшелік – олардың жұмыс істеу принципі топырақты (немесе жынысты) кесу арқылы бұзу процесіне негізделген.

Талдау нәтижелеріне сүйене отырып, морфологиялық ағаш құрылады [7]. 2-суретте берілген матрица негізінде барлығы 28 қозғалыс траекториясы қамтылған. Гидромеханикалық жұмыс органдары дәл осындай 28 түрлі қозғалыс траекториясына ие болады. Осы сызбаға сәйкес, морфологиялық ағашқа ағынды жұмыс органдарының 9

реактивті моменттердің динамикалық тұрақтандыруы үшін элементтер саны тек жұп болуы тиіс;

- гидромеханикалық топырақ бұзуда механикалық және пневматикалық тасымалдау тәсілдері мүмкін емес;
- машина циклдік режимде жұмыс істегенде шнек, элеватор, пневмотранспортер немесе гидротранспортер арқылы тасымалдау мүмкін емес;
- шнек, элеватор және пневмотранспортер арқылы тасымалдау сазды ерітінді ортасында мүмкін емес [8].

Бұл ерекшеліктердің комбинацияларының саны гипотетикалық жұмыс органдарының конструкцияларын сипаттайтын өрнектер жиынтығының өлшемін анықтайды. Алынған көптеген өрнектер бұдан әрі жұмыс органдары қозғалысының дифференциалды теңдеулерін құру үшін база болады.

Жер қазатын машиналардың жұмыс органдарының математикалық моделін есептеу және әзірлеу үшін жұмыс органдары жұмысының қозғалысына кедергі күштерін белгілеу қажет. Жер қазатын машиналардың кедергі күштерін анықтау үшін осы күштердің жіктелуі жүргізілді. Жер қазу машиналарының жұмысы кезінде жұмыс органдарында кесу және тасымалдау күштері пайда болады [9].

Топырақты кесу жұмыстары «құрғақ» қазу алдында және сазды ерітіндісінің астында жүргізіледі. «Құрғақ» әдіспен бұзылған топырақ шнек, шөміш немесе элеватор арқылы тасымалданады. Сазды ерітіндісінің астында бұзылған топырақ эрлифт арқылы тасымалданады.

Жұмыс органдары жұмысының қозғалысына кедергі күштерінің ұсынылған жіктемесі жұмыстың төрт блогын береді [10]:

- 1 - блок – құрғақ жағдайда кесуге қарсы тұратын күштер, транспортер әсерінсіз;
- 2 - блок – құрғақ жағдайда кесуге қарсы тұратын күштер, транспортердің әсерімен;
- 3- блок – суда (сұйықтықта) кесуге қарсы тұратын күштер, транспортер әсерінсіз;
- 4 - блок – суда (сұйықтықта) кесуге қарсы тұратын күштер, транспортердің әсерімен.

Анализ нәтижесінде [11] әр блокқа тәуелділіктер анықталған.

Топырақты кесудің кедергі күшін құралдың берілісі А мен айналуының меншікті кедергі күштері арқылы анықталады. Сонда бірінші блок үшін жұмыстың қозғалысының математикалық үлгісі келесі түрде жазылады:

$$\begin{cases} m\ddot{z} = Q - Ah \\ J\ddot{\varphi} = M - BhR \end{cases} \quad (1)$$

мұндағы m – жұмыс органының массасы;

\ddot{z} – жұмыс органының қозғалысының сызықтық үдеуі;

J – айналмалы жұмыс мүшесінен туындайтын инерциялы күштердің моменті;

$\ddot{\varphi}$ – жұмыс мүшесі қозғалысының бұрыштық үдеуі, $\dot{\varphi} = 0$;

Q – жұмыс органының беріліс күші;

h – кесілетін жоңқаның қалыңдығы;

A – жұмыс органын жоңқаның бірлік қалыңдығына h берілісі үшін қажет күштің шамасын анықтайтын жұмыс органы берілісінің меншікті кедергі күші;

B – қалыңдығы h болатын бет қабатын бұзу үшін қажетті моменттің шамасын анықтайтын, беттің бұзылуы кезінде жұмыс элементінің айналуына меншікті кедергі күші [12].

Транспортердің әсерінен жұмыстың «құрғақ» түрде қозғалысының математикалық үлгісі келесідей сипатталады:

$$\begin{cases} m\ddot{z} = Q - Ah + Pz + P_{\text{реак}}, \\ J\ddot{\varphi} = M - BRh \end{cases}, \quad (2)$$

мұндағы $P_{\text{реак}}$ - транспортердің әсер ететін реактивті күші;

Pz - транспортер ұзындығының бір метріне шаққандағы топырақтың салмағы.

Транспортердің әсерінсіз су астындағы (сұйықтық) жұмыс қозғалысының математикалық моделі келесідей сипатталады:

$$\begin{cases} m\ddot{z} = Q - A\alpha_z Zh - P_b - k_b Z - k_\delta Z \\ J\ddot{\varphi} = M - B\alpha_z ZhR - k_p \omega^2 \end{cases}, \quad (3)$$

мұндағы $A\alpha_z Zh$ – жұмыс органының бетінен берілуіне кедергіні анықтайтын мән;

P_b – жұмыс органының сұйықтыққа үнемі батырылатын бөлігіне әсер ететін итеруші күш;

$k_b Z$ – жұмыс органының (мысалы, штанганың) бөлігіне әсер ететін күш, оның көлемі ерітіндіге батырылған кезде траншея тереңдігінің артуымен артады;

$k_\delta Z$ – жұмыс органыны штангасының ерітіндіге қарсы үйкеліс күші;

$B\alpha_z ZhR$ – топырақтың бұзылуына кедергі келтіру моменті;

$k_p \omega^2$ – жұмыс элементінің айналуына гидродинамикалық кедергі.

Су астында (сұйықтықта) транспортердің әсерінен жұмыс қозғалысының математикалық үлгісі келесідей сипатталады [13]:

$$\begin{cases} m\ddot{z} = Q - A\alpha_z Zh + P_T + Pz - P_b - k_b Z - k_\delta Z \\ J\ddot{\varphi} = M - B\alpha_z ZhR - k_p \omega^2 \end{cases}. \quad (4)$$

Жер қазу жабдығының жұмыс режимін математикалық модельдеу кезеңінде оптималдық критерийлері ретінде келесі параметрлер қарастырылады: энергия шығындарының минимумы; беріліс күшінің және жұмыс органының айналу жиілігінің ең жоғарғы рұқсат етілген мәндері; құралдың бір өтуіндегі максималды қашықтық немесе құралдың тозу мөлшерінің минимумы; максималды өнімділік, әртүрлі қарқын көрсеткіштерінің кедергі күштері және т.б.

Сонымен қатар, үрдістің меншікті энергия сыйымдылығы сияқты параметр бар, оны машиналардың энергетикалық көрсеткіштерін салыстыру үшін жиі қолданады.

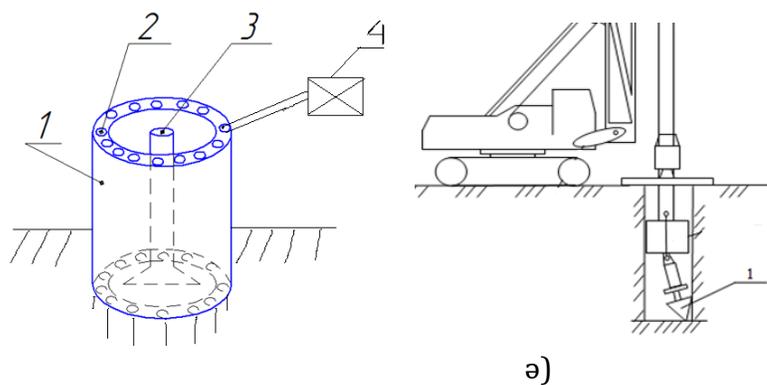
Нәтижелер мен талқылау

Зерттеу барысында алынған математикалық модельдер жер қазу машиналарының жұмыс режимдерін оңтайландыруда, жаңа үлгілерді жобалауда және бар жабдықтардың тиімділігін арттыруда қолдануға болатыны дәлелденді. Алынған нәтижелер көрсеткендей, морфологиялық және динамикалық талдауды кешенді қолдану машинаның құрылымдық және энергетикалық параметрлерін жетілдірудің ғылыми негізін қамтамасыз етеді.

Жер жұмыстары кезінде қолданылатын жер қазатын машиналардың жұмыс мүшелерінің мүмкін болатын құрылымдары әзірленген.

Әзірлеменің бірі кескіш коронка ретіндегі жұмыс мүшесінің топыраққа ендіруі (бұрғылау) және оның ілгерлімелі қозғалысы жұмыс мүшесінің жебе мен тұтқа гидроцилиндрлерінің қысым күшімен іске асырылады. Гидротранспортер ұңғымадан ерітіндімен араласқан өңделген топырақты тасымалдауға арналған. Топырақтық жағдайларға және ұңғыманы қазу тереңдігіне байланысты гидротранспортер топырақтық сорғы режимінде, сондай-ақ, эрлифт режимінде жұмыс істей алады [14].

Сонымен қатар, топырақ ағындық жұмыс органымен бұзылатын әзірleme берілген. Қондырғы қабырғаларға 1 орнатылған құбырлар 2 арқылы жоғарғы қысыммен суды сору мүмкіндігімен орындалған бетон сақинадан тұрады. Сонымен қатар пульпаны 3 сорып алатын сорғы 4 болады (сурет 3, ә) [15].



а)
1- қабырға; 2 – құбырлар;
3 – пульпа; 4 – топырақты сорғы

ә)
1 – кесу коронкасы

3-сурет. – Жер қазатын машиналардың жұмыс мүшелерінің мүмкін болатын және әрекеттегі құрылымдары

Осылайша жұмыс органы құрылымының сипаттамасына қажетті және жеткілікті белгілеріне: топырақты бұзу әдісі, жұмыс ортасының сипаттамасы, бұзатын және тасымалдайтын құралдың орындалу түрі, тасымалдау әдістері, жұмыс режимі, жұмыс жабдығын ілу түрі жатады. Берілген белгілердің үйлесім сандары гипотетикалық жұмыс органдарының құрылымын суреттейтін көптеген өрнектердің өлшемін білдіреді.

Жалпы, ұсынылған әдіс құрылыс саласындағы жер қазу процестерін механикаландыру мен энергия тиімділігін арттыруға бағытталған тәсіл болып табылады.

Қорытынды

Қойылған мақсатқа қарай жер қазатын машиналардың жұмыс органдарының параметрлеріне морфологиялық талдау жүргізілді. Нәтижесінде ерекшеліктердің әртүрлі комбинациялары гипотетикалық жұмыс органдарының конструкцияларын сипаттайтын өрнектер жиынтығын анықтауға мүмкіндік берді. Бұл жиынтық кейін жұмыс органдарының әр түрлі ортадағы қозғалысының дифференциалды теңдеулерін құруға негіз болды.

Қозғалысқа қарсы күш блоктарының жиындарының қиылысуы жер қазу машиналарының жұмыс органдарының төрт математикалық үлгілерін әзірледі және оның параметрлерін анықтады.

Алынған математикалық модельдерді зерттеу нәтижесінде беру жылдамдығын, беру күшін, ұңғылау тереңдігін, сазбалшықты ерітіндідегі қозғалысқа кедергіні, топырақты тасымалдау мен оны кесуге кедергіні байланыстыратын тәуелділіктер анықталды.

Жалпы қуаттың бұрғылау өнімділігіне қатынасын білдіретін меншікті энергия сыйымдылығы өлшемі бойынша режимнің оңтайлы параметрлері белгіленген.

Автордың қосқан үлесі. Автор зерттеу тақырыбын анықтап, ғылыми мәселені негіздеді, әдебиеттерге талдау жүргізді және зерттеу әдістемесін әзірледі. Тәжірибелік және теориялық зерттеулерді орындап, алынған нәтижелерге талдау жасады. Мақаланың мәтінін толық дайындап, қорытындыларды тұжырымдады және соңғы нұсқасын бекітті.

Әдебиеттер тізімі

1. Электрондық үкімет порталы. - URL:<https://www.gov.kz/memleket/entities/stat/press/news/details/1052672?lang=ru> (Қаралған күні: 10.11.2025). - электронды ресурс.
2. Баловнев В.И. Моделирование процессов взаимодействия со средой рабочих органов дорожно-строительных машин. - М.: Высшая школа, 1981. – 335 с. - Кітап
3. Кадыров А.С., Мулдағалиев З.А., Нурмаганбетов А.С., Курмашева Б.К., Жунусбекова Ж.Ж. Теоретические основы проектирования и расчета бурильных и фрезерных землеройных машин. - Караганда, 2010. – 220 с. - журнал
4. Кадыров А.С., Жунусбекова Ж.Ж., Ганюков А.А. Расчет на прочность фрезерного рабочего органа землеройной машины, работающей в глинистом растворе // Вестник СибАДИ. Омск. - 2015. № 4 (44). – С. 125-130 - журнал
5. Бестембек Е.С., Жунусбекова Ж.Ж. Нагружение рабочего органа вращательного действия, активизированного струей жидкости высокого давления // Научный журнал Вестник Евразийского национального университета им. Л.Н. Гумилева. - Астана, 2015. - №4(107). – С. 144-149. - журнал
6. Kadyrov, A., Zhunusbekova, Z., Ganyukov, A., Kadyrova, I., Kukeshova, A. General characteristics for loading the working elements of drilling and milling machines when moving in the clay solution. Communications - Scientific Letters of the University of Žilina. - 2021, 23(2) – P 97-105. DOI: [10.26552/COM.C.2021.2.B97-B105](https://doi.org/10.26552/COM.C.2021.2.B97-B105) - журнал

7. Zhunusbekova Zh. Zh., Kadyrov A. S. Study of digging machine flat element loading in clay solution // Scientific Bulletin of National Mining University Scientific and technical journal No 2 (152), Dnipropetrovsk, State Higher Educational Institution "National Mining University". - 2016. - P. 30-34. - журнал
8. Жунусбекова Ж.Ж. Моделирование движения фрезерного рабочего органа землеройной машины//Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – М.: Академия естествознания. - 2015. – № 10. – С. 426-428. - журнал
9. Кабикенов С.Ж., Жунусбекова Ж.Ж. Классификация сил сопротивления движению рабочих органов вращательного действия // XIII междунар. науч.-практ. конф. «Современные достижения науки-2017» - Прага: Publishing House «Education and Science», 2017. – С. 13-16. - конференция
10. Першин Г.В., Кадыров А.С., Жунусбекова Ж.Ж. Местные глины для строительства способом «стена в грунте» // Научно-технический сборник «Новости науки Казахстана». – Алматы: НЦНТИ, 2015. - №3(125). - С. 192- 204. - журнал
11. Жунусбекова Ж.Ж., Кадыров А.С. Нагружение и экспериментальное исследование конструкции рабочего органа землеройной машины в глинистом растворе//Вестник Казахской Академии транспорта и коммуникаций им. М. Тынышпаева. – Алматы: КазАТК, 2015. – № 2-3 (93). – С. 70-76. – журнал
12. Kadyrov A.S., Zhunusbekova Z.Z., Ganyukov A.A. Study and calculation of earth-moving machines for the construction by wall in the ground method. Material and mechanical engineering technology Volume 1 №1, 2021 p. 3-8. - журнал
13. Kadyrov A. A., Ganyukov A.A., Balabekova K.G., Zhunusbekova Z.Z., Suleev B.D. Scientific and engineering bases for development of mobile overpasses. The journal Material and Mechanical Engineering Technology, Karaganda: KTU, 2020, №2, P.7-13. - журнал
14. Kadyrov A., Kukeshova A., Dyussenbaev E., Zhunusbekova Z., Bezkorovainy P. Theoretical and experimental study of diesel engine exhaust gas purification in a vertical ultrasonic muffler stand. Communications – Scientific Letters of the University of Zilina, 2026, Vol.28, No.1, P.B18-B29 - DOI: 10.26552/com.C.2026.009 - журнал
15. Кадыров А.С., Жунусбекова Ж.Ж., Сериков Ш.М., Омаров Ж.К. Оборудование для бурения скважин переменного диаметра. Инновационный патент на изобретение №24135 от 23.09.15 г. – патент на изобретение.

Ж.Ж. Жунусбекова

НАО «Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова»

Морфологический анализ рабочих органов землеройных машин и математическое моделирование динамики движения

Аннотация. В данной статье рассматриваются научно-методические основы совершенствования новых типов землеройных машин и рабочих органов, широко

применяемых в дорожной и строительной отраслях. Стремительный рост объемов строительства в Казахстане обуславливает необходимость механизации землеройных процессов и повышения их эффективности. Актуальность землеройных машин обусловлена их широким применением в различных отраслях промышленности, связанных со строительством дорожных, транспортных, водохозяйственных, гидротехнических, промышленных, гражданских и сельскохозяйственных объектов. Для этого проведен морфологический анализ рабочих органов землеройных машин и предложены методы математического моделирования их движения. В ходе исследования проведена классификация по способам разрушения грунта, рабочей среде, способам транспортирования, рабочему циклу и видам крепления к базовой машине, а также выявлено многообразие гипотетических конструкций рабочих органов. На основе морфологического дерева получены 484 возможных варианта рабочих органов. Разработаны четыре математических блока движения рабочих органов в различных условиях среды с учетом сил сопротивления резанию и транспортированию. Разработанные модели позволяют снизить энергоемкость процесса разработки грунта, оптимизировать мощность передачи и частоту вращения, а также снизить удельный расход энергии машин. Полученные результаты имеют практическое значение при проектировании и совершенствовании дорожно-строительной техники.

Ключевые слова: землеройные машины, рабочие органы, резание грунтов, среда, силы сопротивления, математическая модель, режим работы.

Zh.Zh. Zhunusbekova

Non-profit joint-stock company "Karaganda Technical University named after Abylkas Saginov"

Morphological analysis of the working bodies of earthmoving machines and mathematical modeling of the dynamics of movement

Abstract. This article considers the scientific and methodological foundations of improving new types of earthmoving machines and working bodies, which are widely used in the road and construction industries. The rapid growth of construction volumes in Kazakhstan creates the need to mechanize earthmoving processes and increase their efficiency. The relevance of earthmoving machines is based on their widespread use in various industries related to the construction of roads, transport, water management, hydraulic, industrial, civil, and agricultural facilities. For this purpose, morphological analysis of the working bodies of earthmoving machines and methods for mathematical modeling of their movement were proposed. During the study, a classification was carried out by soil destruction methods, working environment, transportation methods, work cycle, and types of attachment to the base machine, and the diversity of hypothetical structures of working bodies was identified. Based on the morphological tree, 484 possible working body variants were obtained. Four mathematical blocks of the movement of working bodies in different environmental conditions were developed, and the forces of resistance to cutting and

transportation were taken into account. The developed models allow to reduce energy consumption of the excavation process, optimize the transmission power and rotation frequency, as well as reducing the specific energy consumption of machines. The obtained results are of practical importance in the design and improvement of road construction equipment.

Keywords: earthmoving machines, working bodies, soil cutting, medium, resistance forces, mathematical model, operating mode.

References

1. Balovnev, V.I. Opredelenie optimal'nyh parametrov i vybor zemlerojnyh mashin v zavisimosti ot uslovij jekspluatacii. – MADI: Moscow, 2010, 134 s.
2. Balovnev V.I. Modelirovanie processov vzaimodejstvija so sredoj rabochih organov dorozhno-stroitel'nyh mashin. - M.: Vysshaja shkola, 1981. – 335 s.
3. Kadyrov A.S., Muldagaliev Z.A., Nurmaganbetov A.S., Kurmasheva B.K., Zhunusbekova Zh.Zh. Teoreticheskie osnovy proektirovanija i rascheta buril'nyh i frezernyh zemlerojnyh mashin. - Karaganda, 2010. – 220 s.
4. Kadyrov A.S., Zhunusbekova Zh.Zh., Ganjukov A.A. Raschet na prochnost' frezernogo rabocheho organa zemlerojnoj mashiny, rabotajushhej v glinistom rastvore // Vestnik SibADI. Omsk. - 2015. - № 4 (44). – S. 125-130
5. Bestembek E.S., Zhunusbekova Zh.Zh. Nagruzhenie rabocheho organa vrashhatel'nogo dejstvija, aktivizirovannogo struej zhidkosti vysokogo davlenija // Nauchnyj zhurnal Vestnik Evrazijskogo nacional'nogo universiteta im. L.N. Gumileva. - Astana, 2015. - №4(107). – S. 144-149.
6. Kadyrov, A., Zhunusbekova, Z., Ganyukov, A., Kadyrova, I., Kukeshova, A. General characteristics for loading the working elements of drilling and milling machines when moving in the clay solution. Communications - Scientific Letters of the University of Žilina. - 2021, 23(2) – P 97-105. DOI: 10.26552/COM.C.2021.2. S 97-105.
7. Zhunusbekova Zh. Zh., Kadyrov A. S. Study of digging machine flat element loading in clay solution // Scientific Bulletin of National Mining University Scientific and technical journal No 2 (152), Dnipropetrovsk, State Higher Educational Institution “National Mining University”. - 2016. – S. 30-34.
8. Zhunusbekova Zh.Zh. Modelirovanie dvizhenija frezernogo rabocheho organa zemlerojnoj mashiny//Mezhdunarodnyj zhurnal prikladnyh i fundamental'nyh issledovanij. – M.: Akademija estestvoznaniya. - 2015. – № 10. – S. 426-428.
9. Kabikenov S.Zh., Zhunusbekova Zh.Zh. Klassifikacija sil soprotivlenija dvizheniju rabochih organov vrashhatel'nogo dejstvija // XIII mezhdunar. nauch.-prakt. konf. «Sovremennye dostizhenija nauki-2017» - Praga: Publishing House «Education and Science», 2017. – S. 13-16.
10. Pershin G.V., Kadyrov A.S., Zhunusbekova Zh.Zh. Mestnye gliny dlja stroitel'stva sposobom «stena v grunte» // Nauchno-tehnicheskij sbornik «Novosti nauki Kazahstana». – Almaty: NCNTI, 2015. - №3(125). - S. 192- 204.

11. Zhunusbekova Zh.Zh., Kadyrov A.S. Nagruzhenie i jeksperimental'noe issledovanie konstrukcii rabocheho organa zemlerojnoj mashiny v glinistom rastvore//Vestnik Kazahskoj Akademii transporta i kommunikacij im. M. Tynyshpaeva. – Almaty: KazATK, 2015. – № 2-3 (93). – S. 70-76.
12. Kadyrov A.S., Zhunusbekova Z.Z., Ganyukov A.A. Study and calculation of earth-moving machines for the construction by wall in the ground method. Material and mechanical engineering technology Volume 1 №1, 2021 r. 3-8.
13. Kadyrov A. A., Ganyukov A.A., Balabekova K.G., Zhunusbekova Z.Z., Suleev B.D. Scientific and engineering bases for development of mobile overpasses. The journal Material and Mechanical Engineering Technology, Karaganda: KTU, 2020, №2, R.7-13.
14. Kadyrov A., Kukeshva A., Dyussenbaev E., Zhunusbekova Z., Bezkorovainy P. Theoretical and experimental study of diesel engine exhaust gas purification in a vertical ultrasonic muffler stand. Communications – Scientific Letters of the University of Zilina, 2026, Vol. 28, No.1, R.B18-B29 - DOI: 10.26552/com.C.2026.
15. Kadyrov A.S., Zhunusbekova Zh.Zh., Serikov Sh.M., Omarov Zh.K. Oborudovanie dlya bureniya skvazhin peremennogo diametra. Innovacionnyj patent na izobretenie №24135 ot 23.09.15 g.

Сведения об авторах:

Жунусбекова Ж.Ж. – автор для корреспонденции, доктор PhD, ассоциированный профессор кафедры «Транспортная техника и логистические системы» Карагандинского технического университета имени Абылкаса Сагинова, ул. Н.Назарбаева 56, 100027, Караганда, Казахстан

Zhunusbekova Zh. Zh. – correspondence author, Doctor PhD, Associate Professor, Department of Transport Engineering, Karaganda Technical University named after Abylkas Saginov, 56 N. Nazarbayev str., 100027, Karaganda, Kazakhstan

Жунусбекова Ж.Ж. – хат-хабар авторы, PhD докторы, Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университетінің Көлік техникасы кафедрасы қауымдастырылған профессор, Н.Назарбаев көшесі 56, 100027, Қарағанды, Қазақстан



Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>)



IRSTI 55.30.03

Review

<https://doi.org/10.32523/2616-7263-2026-154-1-216-228>

Robotization in the Production of Distribution Power Transformers - Technologies, Advantages and Prospects of Industry 4.0

G.A. Smailova¹ , A.M. Alshynova² , A.E. Uderbayeva*¹ ,
Sh. Koshanova³ , Y. Zhamankulov¹ 

¹ Satbayev University, Almaty, Kazakhstan,

² Almaty Technological University, Almaty, Kazakhstan

³ Civil Aviation Academy, Almaty, Kazakhstan

E mail: 1g.smailova@satbayev.university, 1a.uderbayeva@satbayev.university, 1Zhamankulov.Y@stud.satbayev.university, 2Aiman16@mail.ru, 3s.koshanova@agakaz.kz*

Abstract. This paper explores modern approaches to introducing robotic automation in the production of power distribution transformers within the Industry 4.0 framework. It identifies the key manufacturing stages where industrial robots provide the greatest efficiency, including electrical steel cutting, coil winding, magnetic core assembly, insulation application, tank welding, and quality control. Particular attention is given to integrating robotic systems with digital manufacturing management platforms, as well as using sensors, machine vision, and real-time monitoring technologies. The findings show that robotic automation significantly improves precision and operational consistency, reduces production cycle time by approximately 30–40%, lowers defect rates from 5–7% to 2–3%, and decreases overall manufacturing costs by 15–20%. Additional benefits include improved energy efficiency, enhanced workplace safety, reduced occupational injuries, optimized resource use, and minimized human error. The study concludes that implementing robotics in transformer manufacturing establishes a foundation for smart factories and fully automated intelligent production systems driven by digitalization, big data, artificial intelligence, and predictive maintenance.

Keywords: robotization, distribution transformer, technological process, industrial automation, digital manufacturing, Industry 4.0.

Introduction

In the modern world, electricity forms the backbone of nearly all spheres of human activity - from industry and transportation to information technologies and utilities. The growing demand for energy, the transition to renewable sources, and ongoing digitalization place increasing requirements on the reliability and efficiency of power systems. In this context, distribution power transformers, which ensure the transmission and distribution of electricity across different voltage levels, play a particularly crucial role [1].

The growth of electricity consumption, the active integration of renewable energy sources, the development of distributed generation, and the expansion of digital grids are forming new requirements for substation and distribution equipment. Transformers must demonstrate high energy efficiency, resistance to overloads, long service life, and minimal operating costs. At the same time, the importance of manufacturing accuracy and stability of electrical characteristics is increasing, since even minor deviations in winding geometry or insulation quality can affect the reliability of the entire power system.

Traditional transformer manufacturing technologies rely heavily on manual labor and semi-automated machines. For decades, operations such as coil winding, magnetic core assembly, installation of insulation, and integration of tank components have been performed either manually or with a minimal degree of mechanization. This approach has several drawbacks: high labor intensity, dependence on worker skills, low repeatability of operations, higher risks of defects and workplace injuries. Moreover, traditional production methods often fail to meet current requirements for flexibility, scalability, and responsiveness to changes in market demand [2].

An additional limitation of the traditional approach is the high labor intensity and extended production cycle. Under conditions of increasing competition and the need to shorten delivery times, such a model becomes less effective. Moreover, heavy and potentially hazardous operations - welding, handling large components, working with impregnation compounds - raise the risk of occupational injuries and require strict safety measures.

The development of industrial robotics has opened new opportunities for modernizing transformer manufacturing. Modern industrial robots are characterized by high positioning accuracy, repeatability, and the ability to operate continuously. Their implementation makes it possible to automate key stages of the technological process: cutting electrical steel, assembling magnetic cores, winding coils, applying insulation coatings, welding transformer tanks, and performing quality control. Robotic systems ensure parameter stability and significantly reduce the influence of the human factor [3].

Meanwhile, advancements in industrial automation and robotics open new opportunities for the electrical engineering industry. Industrial robots, characterized by their precision, consistency, and reliability, are becoming key tools for modernizing production processes. Robotization addresses multiple challenges simultaneously: it shortens production time, reduces costs, improves product quality and workplace safety, and creates favorable conditions for digital monitoring and control methods [3].

Robotics gains particular importance within the framework of the Industry 4.0 concept. This concept involves the integration of cyber-physical systems, digital twins, big data technologies, and artificial intelligence into manufacturing processes. In such an environment, robotic equipment becomes part of a unified digital ecosystem in which data on machine condition, processing parameters, and product characteristics are analyzed in real time. This not only increases productivity but also enables the prediction of potential deviations, preventing defects at early stages.

Global practice confirms the effectiveness of this approach. Leading manufacturers of power equipment, including ABB, Siemens Energy, and other companies, are actively implementing robotic production lines in transformer manufacturing, achieving significant reductions in production cycle time and defect rates [5–7]. According to industry studies, automation can reduce manufacturing time by 30–40%, decrease labor intensity by approximately one third, and lower production costs by up to 20%. These figures demonstrate the strong economic feasibility of investing in robotics [5–7,10].

In addition to technical and economic aspects, the social dimension is also significant. The transition to automated systems changes the workforce structure within enterprises: the demand for low-skilled manual labor decreases, while the need for engineers specializing in programming, maintenance, and diagnostics of robotic systems increases. This transformation requires revision of educational programs and systematic upskilling of personnel [2].

Thus, the introduction of robotization into the production and distribution of power transformers is not only a technical necessity but also a strategic direction for the development of power engineering. It allows manufacturers to address complex challenges: improving production efficiency, ensuring higher product quality and reliability, reducing costs, enhancing occupational safety, and aligning with global digitalization trends.

The objective of this study is to analyze modern approaches to the robotization of technological processes in the production of distribution power transformers, to identify their advantages and limitations, and to outline promising directions for development within the transition toward digital manufacturing systems [1-3].

The methodology

This study is based on the analysis of current trends and technologies applied in the production of distribution power transformers, with a special focus on the robotization of key technological stages. The section describes the information sources, regulatory framework, robotic equipment considered, and the methods applied to evaluate the efficiency of automation [1-7,9,10].

The following materials were used as the basis for this study: international standards IEC 60076, which regulate the design, testing, and operation of power transformers; national standards (GOST 3484.1-88, GOST 11677-85) that define quality and parameter requirements for transformers; technical reports and white papers from leading global manufacturers of robotic systems (ABB Robotics, KUKA, FANUC, Yaskawa, Siemens Energy); recent academic publications in the field of robotization of electrical engineering production and digital factories; as well as data from industry conferences and analytical reviews on the implementation of Industry 4.0

technologies [8,9]. These materials provided a comprehensive understanding of the current state of transformer manufacturing and highlighted the areas where robotization yields the most significant results [1-3].

The manufacturing process of distribution power transformers includes several key stages: preparation and processing of electrical steel - cutting, stamping and preparing sheets for magnetic core assembly; magnetic core assembly - stacking, pressing and fixing the sheets; coil winding - forming primary and secondary windings with high precision; insulation and impregnation - applying insulating materials, vacuum impregnation and drying; assembly of the tank and active part - integrating the magnetic core, windings and insulation; testing and quality control - measuring electrical parameters, checking mechanical strength and ensuring tightness [1,4]. At each of these stages, robotic systems can be applied, which became the subject of analysis [1-3,5,6].

In the study the following categories of equipment were considered: manipulator robots for stacking magnetic core sheets and installing coils; automated CNC and laser cutting lines ensuring high precision in processing electrical steel; robotic winding complexes providing uniformity and repeatability in coil formation; robots for applying coatings and insulating materials, including spraying and impregnation systems; automated welding complexes for assembling transformer tank components; machine vision systems for assembly quality control and defect detection [5,6].

To assess the impact of robotization on the production process the following methods were applied: comparative analysis - comparison of traditional and robotized production indicators such as production cycle duration, labor intensity, unit production cost, defect rate and energy efficiency (Figure 1); economic analysis - evaluation of ROI (Return on Investment), the payback period of investments in robotization, TCO (Total Cost of Ownership), total costs of equipment ownership, and economic effect achieved through reduced manual labor and lower defect rates (Figure 2); technological modeling - use of digital twins of production processes to predict the results of implementing robotic systems; socio-organizational analysis - assessment of the influence of robotization on employment structure, staff retraining needs, and changes in occupational safety and health [1-3].

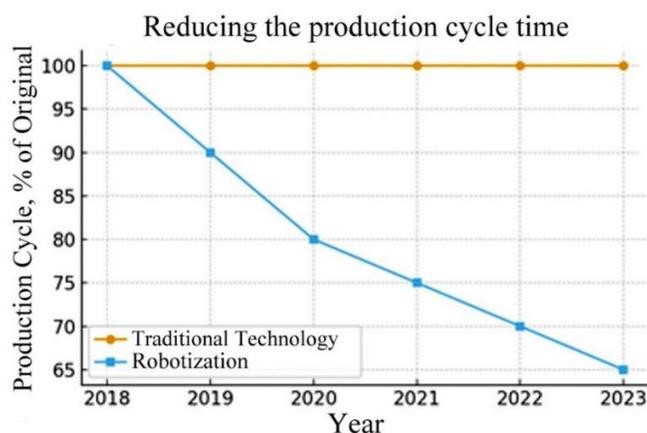


Figure 1. Dynamics of production cycle reduction

Note: Compiled based on the data presented in references [1–3]

The application of a combined methodology made it possible not only to quantify the benefits of robotization (cost reduction, higher quality, faster production) but also to account for organizational, economic, and social consequences. This approach ensures a holistic understanding of the role of robotization in modernizing transformer manufacturing.

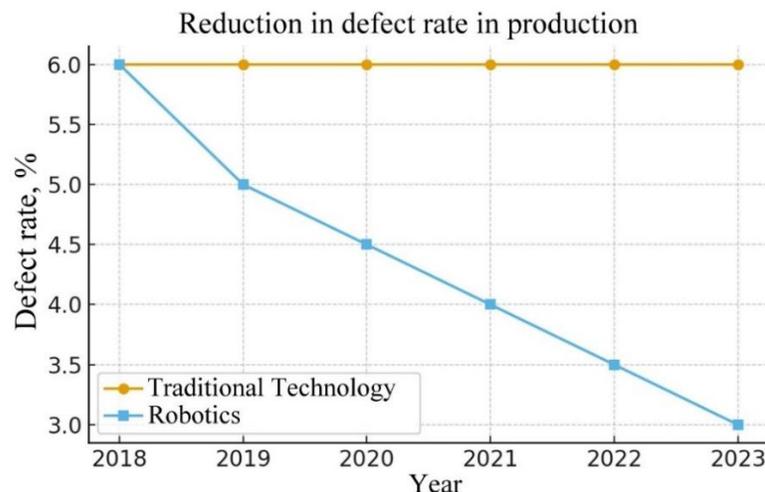


Figure 2. Reducing the level of defects in production

Note: Compiled based on the data presented in references [1–3]

Findings/Discussion

Key Directions of Robotization in Transformer Manufacturing. Robotization in the production and distribution of power transformers covers almost all stages of the technological process. The greatest efficiency is demonstrated in the following areas [3,5,6].

Automated cutting of electrical steel. CNC laser and plasma installations ensure high accuracy and speed of sheet processing, minimize waste and increase the yield of suitable products. The use of robotic loaders accelerates material handling and reduces the workload on personnel.

Magnetic core assembly. Manipulator robots are used for stacking, pressing and fixing the sheets into packages. This reduces the likelihood of misalignment, ensures repeatability of operations and improves magnetic core quality.

Coil winding. One of the most labor-intensive and critical processes is the formation of transformer windings. Robotic winding complexes provide uniform conductor distribution, high density and precision of winding. This reduces overheating risks, improves electrical performance and extends transformer service life.

Insulation and impregnation. Robots ensure the consistent application of insulating materials, perform vacuum impregnation and drying operations. This approach minimizes defects, increases reliability and dielectric strength of insulation.

Tank welding and machining. Robotic welding systems are used in the production of transformer tanks. They provide consistent seams, reduce the risk of defects and improve tightness. Automated machining lines reduce dimensional deviations and improve the accuracy of fits [11-15].

Quality control. Machine vision and non-destructive testing systems integrated with robots enable the inspection of each unit. This eliminates human error and ensures objectivity of quality control. Comparative Analysis of Traditional and Robotized Production. To evaluate the effectiveness of robotization, a comparative analysis of key production parameters was carried out (Tables 1,2).

Table 1. Comparison of traditional and robotized transformer production

Indicator	Traditional Technology	Robotized Technology
Production cycle duration	100%	60-70%
Labor intensity	High	30-40% lower
Coil winding quality	Medium, operator-dependent	High accuracy and repeatability
Defect rate	5-7%	2-3%
Occupational safety	Medium, heavy workload	High, minimal manual operations

Note: Compiled based on the data presented in references [1–3]

Table 2. Economic Effect of Robotization

Indicator	Before Implementation	After Implementation
Productivity	100 units/year	140-150 units/year
Cost per unit	100%	80-85%
Payback period	-	3-5 years
Energy efficiency	100%	110-120%

Note: Compiled based on the data presented in references [1–3]

The results showed:

- Production cycle duration reduced by 30-40%;
- Labor intensity decreased by 35-45%;
- Coil winding precision reached up to 99% repeatability;
- Defect rate reduced from 5-7% to 2-3%;
- Unit production cost decreased by 15-20%.

Additionally, the introduction of robotization increases the energy efficiency of the enterprise by 10-15% through more rational use of equipment.

The economic analysis showed that ROI (Return on Investment) is 3-5 years, depending on the scale of production; TCO (Total Cost of Ownership) decreases due to reduced labor costs and fewer defects; the use of robotic systems increases production output by 40-50% [3,5,6]. For example, the introduction of automated winding machines at a Siemens plant made it possible to increase transformer output by 35% without expanding the workforce. Case Studies of Implementation.

ABB (Germany, 2022) implemented an automated cutting and magnetic core assembly line, which reduced steel waste by 12% and decreased the cycle time by 25%. Hyundai Heavy Industries (South Korea, 2021) introduced robotic welding complexes for transformer tank manufacturing. As a result, tightness improved and the number of warranty cases decreased by 18%.

Siemens Energy (Austria, 2020) developed a digital twin system for transformer production integrated with robotic lines. This made it possible to predict product output parameters and optimize production processes [5,6,7].

Robotization affects not only technical and economic indicators but also the social sphere: the demand for unskilled manual labor decreases; the demand for specialists in the maintenance of robots and automation systems increases; working conditions improve and the level of occupational injuries decreases; the development of staff retraining programs is required [1-3].

Further development of robotization is associated with the introduction of artificial intelligence to optimize robot performance; the use of collaborative robots (cobots) capable of interacting with humans on the same production line; the integration of robotic systems into enterprise digital twins; and the transition to fully smart factories, where production processes are managed in real time based on big data.

Conclusion

The conducted study showed that robotization of the technological process of manufacturing distribution power transformers is a strategic direction for the development of the modern electrical engineering industry [1-3,5].

Summary of Analysis Results:

1. Reduction of production cycle duration. Robotization reduces transformer manufacturing time by 30-40% through the automation of key operations such as steel cutting, coil winding, magnetic core assembly and tank welding.

2. Improvement of product quality. The use of robotic systems ensures consistent repeatability of technological operations and reduces defect probability by a factor of 2-3 compared with traditional technology.

3. Cost reduction and increased economic efficiency. By lowering manual labor, reducing material waste and optimizing processes, production costs decrease by 15-20%, while the payback period of investments in robotization averages 3-5 years.

4. Improvement of working conditions and safety. Robots eliminate human involvement in the most dangerous and heavy operations (welding, moving heavy parts, insulation impregnation). This reduces the level of injuries and improves the environmental situation at the enterprise.

5. Social and workforce changes. Robotization requires staff retraining and a shift from mass manual labor to specialists in the maintenance and programming of robotic systems.

Scientific and Practical Significance. The introduction of robotization in transformer manufacturing makes it possible to increase product competitiveness in the global market; ensure higher production energy efficiency; lay the foundation for the creation of “digital factories” and the transition to the Industry 4.0 concept; and expand the use of artificial intelligence and machine vision technologies for quality control [3,6].

Prospects for Further Research. Development and implementation of digital twins of transformers and production processes to predict product characteristics already at the design stage; application of collaborative robots (cobots) for joint work with operators on assembly lines; integration of robotic systems with Big Data and IoT platforms to enable real-time monitoring and production management; exploration of artificial intelligence methods for adaptive optimization of production modes and defect prevention [3,10].

General Conclusion. Thus, robotization of the technological process of manufacturing distribution power transformers not only improves product quality and reduces production costs but also forms the foundation for the transition to fully automated intelligent production systems. This direction is key for the long-term development of power engineering, as it combines technological progress, economic benefits and social significance [1-3,5-7,10-15].

The contribution of the authors.

Smailova G.A. – significant contribution to the concept of the work; collection, interpretation of the results of the work, consent to be responsible for all aspects of the work, and writing a text.

Alshynova A.M. – analysis or interpretation of the results of the work.

Uderbayeva A.E. – worked on data collection, analysis, interpretation, drafting, and editing.

Koshanova Sh. – is responsible for literature review and scientific consulting.

Zhamankulov Y. – collection, analysis or interpretation of the results of the work.

References

1. Soori, M., Dastres, R., Arezoo, B., & Karimi Ghaleh Jough, F. (2024). Intelligent robotic systems in Industry 4.0. *Journal of Advanced Manufacturing Science and Technology*, 4(3), 2024007. <https://doi.org/10.51393/j.jamst.2024007>
2. Ma, Y., Ma, Y., & Ding, Z. (2025). Can industrial robots boost carbon total factor productivity. Evidence from China. *Journal of Innovation & Knowledge*, 10, 100857.
3. Goecks, L. S., Habekost, A. F., Coruzzolo, A. M., & Sellitto, M. A. (2024). Industry 4.0 and smart systems in manufacturing: Guidelines for the implementation of a smart statistical process control. *Applied System Innovation*, 7(2), 24. <https://doi.org/10.3390/asi7020024>
4. Bartolo, P. et al. (2023). *A systematic literature review: Industry 4.0 Based Monitoring and Control Systems in Additive Manufacturing. Machines*, 11(7), 712. <https://doi.org/10.3390/machines11070712>
5. Tartici, I., Kilic, Z. M., & Bartolo, P. (2023). A systematic literature review: Industry 4.0 based monitoring and control systems in additive manufacturing. *Machines*, 11(7), 712. <https://doi.org/10.3390/machines11070712>
6. Dhanda, M., Rogers, B., Hall, S., Dekoninck, E., & Dhokia, V. (2025). Reviewing human-robot collaboration in manufacturing: Opportunities and challenges in the context of industry 5.0. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 93, 102937. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2024.102937>
7. Bahrin, M. A. K., Othman, M. F., Azli, N. H. N., & Talib, M. F. (2023). Industry 4.0: A review on

- industrial automation and robotic. Jurnal Teknologi (Sciences & Engineering, 78, Article 9285. <https://doi.org/10.11113/jt.v78.9285>
8. Ballestar, M. T., Díaz-Chao, Á., Sainz, J., & Torrent-Sellens, J. (2021). Impact of robotics on manufacturing: A longitudinal machine learning perspective. *Technological Forecasting and Social Change*, 162, 120348. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2020.120348>
 9. Keshvarparast, A., Battini, D., Battaia, O., et al. (2024). Collaborative robots in manufacturing and assembly systems: Literature review and future research agenda. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 35, 2065–2118. <https://doi.org/10.1007/s10845-023-02137-w>
 10. Abro, G. E., & Mahmoud, E. (2025). Advances in intelligent industrial manipulators for smart manufacturing and standardized automation technologies. *Advanced Robotics*. <https://doi.org/10.1007/s44430-025-00012-2>
 11. Rane, N. (2023). Transformers in industry 4.0, industry 5.0, and Society 5.0: roles and challenges. <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4609915>
 12. Tazhibayev, A., Utepbergenov, I., & Skliarova, I. (2025). Development of Customer-Focused Automated Systems for Transformer Design and Manufacturing: A Comprehensive Review. *Journal of Computational and Cognitive Engineering*, 4(3), 251-266. <https://doi.org/10.47852/bonview|CCE52025158>
 13. Sanneman, L., Fourie, C., & Shah, J. A. (2021). The state of industrial robotics: Emerging technologies, challenges, and key research directions. *Foundations and Trends® in Robotics*, 8 (3), 225-306. <https://doi.org/10.1561/23000000065>
 14. Folgado, F. J., Calderón, D., González, I., & Calderón, A. J. (2024). Review of Industry 4.0 from the perspective of automation and supervision systems: Definitions, architectures and recent trends. *Electronics*, 13(4), 782. <https://doi.org/10.3390/electronics13040782>
 15. Tai, K., El-Sayed, A. R., Shahriari, M., Biglarbegan, M., & Mahmud, S. (2016). State of the art robotic grippers and applications. *Robotics*, 5(2), 11. DOI:10.3390/robotics5020011

**Г.А. Смаилова¹, А.М. Алшынова², А.Е. Удербаева*¹, Ш. Кошанова³,
Е. Жаманқұлов¹**

¹*Satbayev University, Алматы, Қазақстан*

²*Алматы Технологиялық университеті, Алматы, Қазақстан*

³*Азаматтық Авиация Академиясы, Алматы, Қазақстан*

Таратушы күштік трансформаторлар өндірісіндегі роботтандыру - заманауи технологиялар, Индустрия 4.0 артықшылықтары мен перспективалары

Аңдатпа. Бұл жұмыста «Индустрия 4.0» тұжырымдамасы аясында тарату күштік трансформаторларын өндіру үдерісіне роботтандыруды енгізудің заманауи тәсілдері талданады. Зерттеу нәтижелері өндірістің қай кезеңдерінде өнеркәсіптік роботтарды қолдану ең жоғары тиімділік беретінін анықтайды: электротехникалық болатты кесу, орамдарды орау, магниттік өзекшелерді жинақтау, оқшаулағыш материалдарды жағу, бактарды дәнекерлеу және сапаны бақылау. Сонымен қатар роботтық кешендерді өндірісті

цифрлық басқару жүйелерімен біріктіру, датчиктерді, машиналық көру жүйелерін және нақты уақыт режиміндегі мониторинг құралдарын пайдалану мәселелеріне ерекше назар аударылады. Зерттеу нәтижелері роботтандыру операциялардың дәлдігі мен қайталанғыштығын едәуір арттыратынын, өндірістік цикл уақытын шамамен 30–40%-ға қысқартатынын, ақаулар деңгейін 5–7%-дан 2–3%-ға дейін төмендететінін және өнімнің өзіндік құнын 15–20%-ға азайтатынын көрсетеді. Қосымша артықшылықтар ретінде энергия тиімділігінің артуы және еңбекті қорғау деңгейінің жақсаруы атап өтіледі, соның ішінде өндірістегі жарақаттанудың төмендеуі, ресурстарды ұтымды пайдалану және адами қателіктердің азаюы. Қорытындылай келе, трансформатор өндірісіндегі технологиялық үдерістерді роботтандыру «ақылды зауыттарға» және толық автоматтандырылған зияткерлік өндірістік жүйелерге көшуге негіз қалайды. Мұндай жүйелерде цифрландыру, үлкен деректерді интеграциялау, жасанды интеллект және жабдықтардың предиктивтік талдауы негізгі рөл атқарады.

Түйін сөздер: роботтандыру, таратушы трансформатор, технологиялық процесс, өнеркәсіптік автоматтандыру, цифрлық өндіріс, Индустрия 4.0.

**Г.А. Смаилова¹, А.М. Алшынова², А.Е. Удербаета^{*1}, Ш.Кошанова³,
Е. Жаманқұлов¹**

¹*Satbayev University, Алматы, Қазақстан*

²*Алматинский Технологический университет, Алматы, Қазақстан*

³*Академия Гражданской Авиации, Алматы, Қазақстан*

Роботизация в производстве распределительных силовых трансформаторов - технологии, преимущества и перспективы Индустрии 4.0

Аннотация. В данной работе анализируются современные подходы к внедрению роботизации в производство распределительных силовых трансформаторов в рамках концепции «Индустрия 4.0». Исследование выявляет технологические этапы, на которых промышленные роботы обеспечивают наибольшую эффективность: резка электротехнической стали, намотка катушек, сборка магнитных сердечников, нанесение изоляционных материалов, сварка баков и контроль качества. Особое внимание уделяется интеграции робототехнических комплексов с цифровыми системами управления производством, применению датчиков, систем машинного зрения и средств мониторинга в реальном времени. Результаты показывают, что роботизация значительно повышает точность и повторяемость операций, сокращает время производственного цикла на 30–40%, снижает процент брака с 5–7% до 2–3% и уменьшает себестоимость продукции на 15–20%. Дополнительные преимущества наблюдаются в энергоэффективности и охране труда, включая снижение травматизма на рабочем месте, оптимизацию использования ресурсов и минимизацию человеческих ошибок. В заключении исследования делается вывод, что роботизация технологического процесса в производстве трансформаторов

закладывает основу для перехода к «умным заводам» и полностью автоматизированным интеллектуальным производственным системам, где центральную роль играют цифровизация, интеграция больших данных, искусственный интеллект и предиктивная аналитика оборудования.

Ключевые слова: роботизация, распределительный трансформатор, технологический процесс, промышленная автоматизация, цифровое производство, Индустрия 4.0.

References

1. Soori, M., Dastres, R., Arezoo, B., & Karimi Ghaleh Jough, F. (2024). Intelligent robotic systems in Industry 4.0. *Journal of Advanced Manufacturing Science and Technology*, 4(3), 2024007. <https://doi.org/10.51393/j.jamst.2024007>
2. Ma, Y., Ma, Y., & Ding, Z. (2025). Can industrial robots boost carbon total factor productivity. Evidence from China. *Journal of Innovation & Knowledge*, 10, 100857. DOI:[10.1016/j.jik.2025.100857](https://doi.org/10.1016/j.jik.2025.100857)
3. Goecks, L. S., Habekost, A. F., Coruzzolo, A. M., & Sellitto, M. A. (2024). Industry 4.0 and smart systems in manufacturing: Guidelines for the implementation of a smart statistical process control. *Applied System Innovation*, 7(2), 24. <https://doi.org/10.3390/asi7020024>
4. Bartolo, P. et al. (2023). A systematic literature review: Industry 4.0 Based Monitoring and Control Systems in Additive Manufacturing. *Machines*, 11(7), 712. <https://doi.org/10.3390/machines11070712>
5. Tartici, I., Kilic, Z. M., & Bartolo, P. (2023). A systematic literature review: Industry 4.0 based monitoring and control systems in additive manufacturing. *Machines*, 11(7), 712. <https://doi.org/10.3390/machines11070712>
6. Dhanda, M., Rogers, B., Hall, S., Dekoninck, E., & Dhokia, V. (2025). Reviewing human-robot collaboration in manufacturing: Opportunities and challenges in the context of industry 5.0. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 93, 102937. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2024.102937>
7. Bahrin, M. A. K., Othman, M. F., Azli, N. H. N., & Talib, M. F. (2023). Industry 4.0: A review on industrial automation and robotic. *Jurnal Teknologi (Sciences & Engineering)*, 78, Article 9285. <https://doi.org/10.11113/jt.v78.9285>
8. Ballestar, M. T., Díaz-Chao, Á., Sainz, J., & Torrent-Sellens, J. (2021). Impact of robotics on manufacturing: A longitudinal machine learning perspective. *Technological Forecasting and Social Change*, 162, 120348. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2020.120348>
9. Keshvarparast, A., Battini, D., Battaia, O., et al. (2024). Collaborative robots in manufacturing and assembly systems: Literature review and future research agenda. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 35, 2065–2118. <https://doi.org/10.1007/s10845-023-02137-w>
10. Abro, G. E., & Mahmoud, E. (2025). Advances in intelligent industrial manipulators for smart manufacturing and standardized automation technologies. *Advanced Robotics*. <https://doi.org/10.1007/s44430-025-00012-2>
11. Rane, N. (2023). Transformers in industry 4.0, industry 5.0, and Society 5.0: roles and challenges. <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4609915>

12. Tazhibayev, A., Utepbergenov, I., & Skliarova, I. (2025). Development of Customer-Focused Automated Systems for Transformer Design and Manufacturing: A Comprehensive Review. *Journal of Computational and Cognitive Engineering*, 4(3), 251-266. <https://doi.org/10.47852/bonviewJCCE52025158>
13. Sanneman, L., Fourie, C., & Shah, J. A. (2021). The state of industrial robotics: Emerging technologies, challenges, and key research directions. *Foundations and Trends® in Robotics*, 8 (3), 225-306. <https://doi.org/10.1561/23000000065>
14. Folgado, F. J., Calderón, D., González, I., & Calderón, A. J. (2024). Review of Industry 4.0 from the perspective of automation and supervision systems: Definitions, architectures and recent trends. *Electronics*, 13(4), 782. <https://doi.org/10.3390/electronics13040782>
15. Tai, K., El-Sayed, A. R., Shahriari, M., Biglarbegan, M., & Mahmud, S. (2016). State of the art robotic grippers and applications. *Robotics*, 5(2), 11. DOI: [10.3390/robotics5020011](https://doi.org/10.3390/robotics5020011)

Information about the authors:

Smailova G.A. – PhD, Associate Professor, Satbayev University, 22 Satpaev St., 050043, Almaty, Kazakhstan

Alshynova A.M. – PhD, Almaty University of Technology, 100 Tole Bi St., 050012, Almaty, Kazakhstan

Uderbayeva A.E. – corresponding author, PhD, Associate Professor, Satbayev University, 22 Satpaev St., 050043, Almaty, Kazakhstan

Koshanova Sh. – Master’s degree, Academy of Civil Aviation, 44 Akhmetov St., 050039, Almaty, Kazakhstan

Zhamankulov Y. – Doctoral student, Satbayev University, 22 Satpaev St., 050043, Almaty, Kazakhstan

Смаилова Г. А. – к.т.н., ассоциированный профессор, Satbayev University, ул. Сатпаева 22, 050043, Алматы, Казахстан

Алшынова А. М. - доктор PhD, Алматинский Технологический университет, ул.Толле би 100, 050012, Алматы, Казахстан

Удербаева А. Е. - автор для корреспонденции, PhD, ассоциированный профессор, Satbayev University, ул. Сатпаева 22, 050043, Алматы, Казахстан

Кошанова Ш. - магистр, Академия Гражданской Авиации, ул. Ахметова 44, 050039, Алматы, Казахстан,

Жаманкулов Е. - докторант, Satbayev University, ул. Сатпаева 22, 050043, Алматы, Казахстан

Смаилова Г. А. – т.ғ.к., қауымдастырылған профессор, Сәтбаев көшесі 22, 050043, Алматы, Қазақстан

Алшынова А. М. - PhD, қауымдастырылған профессор, Технологиялық университеті, Төле би көшесі 100, 050012, Алматы, Қазақстан

Удербаева А. Е. – хат-хабар авторы, PhD, қауымдастырылған профессор, Сәтбаев көшесі 22, 050043, Алматы, Қазақстан,

Кошанова Ш. - магистр, Азаматтық Авиация Академиясы, Ахметов көшесі 44, 050039,

Алматы, Қазақстан

Жаманкулов Е. - докторант, Satbayev University, Сәтбаев көшесі 22, 050043, Алматы, Қазақстан



Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).



МРНТИ 55.51

Научная статья

<https://doi.org/10.32523/2616-7263-2026-154-1-229-248>

Перспективы развития конструкции выносных опор железнодорожных кранов

Г.Б. Хайытбаева^{1*} , А.Ж.Мурзагалиев² , Б.Т.Сазамбаева¹ ,
Г.М.Ордабаева² , Ж.З.Косыбаев¹ 

¹Евразийский национальный университет им. Л.Н.Гумилева, Астана, Казахстан.

²Актюбинский региональный университет имени К.Жубанова, Актюбе, Казахстан.

*E mail: *gloriyahaitbae@gmail.com, ²amurzagaliyev@zhubanov.edu.kz,
¹a.sazambaeva_t@mail.ru, ²gulsairaordabaeva@gmail.com, ¹kossybayev_zhz@enu.kz*

Аннотация. В статье рассмотрена проблема обеспечения устойчивости и эксплуатационной безопасности железнодорожных восстановительных кранов. Показано, что одним из ключевых узлов, определяющих устойчивость крана при выполнении погрузочно-транспортных операций, являются выносные опоры, воспринимающие основную часть силовых нагрузок и обеспечивающие перераспределения на опорную поверхность. Целью исследования является анализ конструктивных решений выносных опор железнодорожных грузоподъемных кранов и обоснование перспективных направлений их конструктивного совершенствования. На основе патентного анализа существующих технических решений разработана классификация современных конструкций выносных опор по следующим группам: системы, предназначенные для снижения удельного давления на грунт; конструкции, различающиеся по конфигурации и компоновке; решения, предусматривающие использование современных материалов в рабочих элементах; системы, оснащенные устройствами контроля устойчивости крана в процессе работы. Проведен сравнительный анализ существующих методик расчета устойчивости железнодорожных кранов с выносными опорами. Показана перспектива повышения эффективности опорных элементов за счет оптимизации их конфигурации и применения современных композитных материалов

Ключевые слова: железнодорожные краны, выносные опоры, устойчивость, аутригер, композитные материалы, морфологическая классификация, опорные реакции, расчётная схема.

Введение

Современные железнодорожные краны являются базовыми составляющими процесса организации строительных и монтажных работ на железнодорожных путях при штатных, так и при нештатных ситуациях. Особую группу составляют восстановительные краны различной грузоподъемности, предназначенные для подъема и перемещения тяжелых грузов в условиях ограниченного пространства и сложных природно-климатических факторов.

Безопасная эксплуатация кранов во многом определяется их устойчивостью при различных режимах работы, включая подъем и опускание груза, изменение положения стрелы, а также воздействие внешних нагрузок. Нарушение устойчивости может привести к аварийным ситуациям и значительным материальным потерям. В связи с этим обеспечение устойчивости является одним из ключевых требований надёжной эксплуатации грузоподъемных машин.

Организационно-технические мероприятия и дополнительные устройства, направленные на обеспечение устойчивости кранов базовых исполнений, регламентируются требованиями, положениями и рекомендациями отраслевых нормативных документов[1].

Однако в реальных условиях эксплуатации нередко возникают нештатные ситуации, требующие разработки дополнительных технических решений, направленных на совершенствование узлов механизмов кранов с целью обеспечения надёжности процессов подъёма и опускания груза.

Одним из основных конструктивных элементов, обеспечивающих устойчивость железнодорожных стреловых кранов, являются выносные опоры - аутригеры, которые в процессе работы воспринимают значительную часть нагрузок, передаваемых на опорную систему крана. Выносные опоры железнодорожных кранов представляют собой механические или гидромеханические устройства, предназначенные для увеличения площади опирания крана и перераспределения нагрузок при выполнении подъёмных операций.

В классической конструкции восстановительных кранов, используется пирамидальная схема опоры, которая воспринимает нагрузку через шток гидроцилиндра и передает нагрузку на грунт через опорные плиты и шпалы. Такая конструкция должна обеспечивать снижение риска опрокидывания и повышение устойчивости крана при работе на рельсовом пути или вблизи него[2].

Традиционные конструкции опорных плит, изготавливаются из стали и отличаются значительной массой. Следует отметить, что применяемые в практике аутригеры железнодорожных кранов требуют значительных временных затрат и физических усилий при их установке. Так, например, на железнодорожном кране ЕДК-2000 для приведения выносной опоры в рабочее положение требуется участие нескольких человек.

Кроме того, при работе на неровном основании или на деформированных шпалах распределение нагрузок между опорами происходит неравномерно. Это приводит к перегрузке отдельных опорных элементов и повышает риск опрокидывания крана. В технической литературе данный вопрос рассматривается достаточно подробно, что связано прежде всего с особенностями условий работы аутригеров[3]. В работе [4] показана необходимость учета реологических свойств грунта с использованием нелинейно-деформируемой модели вместо традиционно применяемой упруго-линейной

модели взаимодействия опорных элементов с грунтом.

В работах[5,6] указывается, что специфической особенностью выносных опор мобильных кранов является их ограниченная адаптивность к различным грунтовым условиям под опорными устройствами, повышенная чувствительность к неравномерности опорных реакций, значительные затраты времени на установочные операции, а также вероятности снижения устойчивости крана при динамических нагрузках и изменениях положения стрелы. При существующих конструкциях выносных опор возможно снижение разгрузки выносных опор до 30-50%. Однако данное мероприятие требует значительного усложнения конструкции, вызванного необходимостью увеличения опорной площади за счет удаления опоры от радиуса поворота.

В работе[7] отмечается, что одним из основных недостатков обеспечения устойчивости железнодорожных кранов является трудности обеспечения опорной поверхности, приводящие к использованию не всех выносных опор, а также ограничения в мобильности их установки. В этих случаях необходимо совершенствование эксплуатационных характеристик отдельных узлов выносных опор.

В результате анализа существующих конструкций выносных опор приведена сравнительная оценка эффективности их использования по сравнению с базовыми вариантами: коэффициент удельных приведенных затрат при увеличении числа перестановок опор в течение часа снижается на 6,6%. Одновременно установлено, что при увеличении числа перестановок опор снижение этого показателя становится более заметным. Последнее указывает на необходимость поиска новых технических решений по совершенствованию конструкции выносных опор.

Краткий анализ проведенных по исследованию выносных опор железнодорожных кранов приводят к необходимости системного анализа исследуемого вопроса.

Методология

Одним из эффективных инструментов выявления перспективных направлений развития конструкций грузоподъемных машин является анализ патентной информации. Патентные источники отражают наиболее актуальные инженерные решения, направленные на повышение эксплуатационных характеристик оборудования, включая устойчивость, надежность и технологичность конструкций.

В рамках настоящего исследования проведен анализ патентных разработок, посвященных совершенствованию опорных устройств стреловых и мобильных кранов. Поиск патентной информации осуществлялся в международных базах данных Google Patents, Espacenet, WIPO, Роспатент период с 1994-2025 гг. В результате изучения материалов установлено, что значительная часть технических решений направлена на повышение устойчивости кранов за счет совершенствования конструкции выносных опор и их взаимодействия с опорной поверхностью.

В результате систематизаций рассмотренных патентных решений выделены следующие основные направления развития конструкций опорных устройств грузоподъемных машин.

Одним из наиболее распространенных направлений является разработка конструкций опорных башмаков и стабилизирующих накладок, обеспечивающих более равномерное распределение нагрузки на опорную поверхность. В ряде патентов предлагаются

стабилизирующие накладки различной формы (квадратной, прямоугольной или круглой), устанавливаемые в нижней части опорного элемента [8–10]. Основная цель подобных решений заключается в увеличении площади контакта опоры с грунтом и снижении удельного давления на основание. Кроме того, применение специальных конструктивных элементов позволяет уменьшить вероятность просадки опор и повысить устойчивость крана при работе на слабых грунтах.

В работе [9] предложена конструкция накладки с развитой фрикционной поверхностью, сформированной системой выступов и углублений. Такая конфигурация обеспечивает повышение коэффициента сцепления опорного элемента с опорной поверхностью и уменьшает вероятность смещение крана при действии горизонтальных нагрузок.

Отдельный интерес представляет модульная конструкция стабилизирующей накладки, предложенная в патенте [10]. Данная конструкция выполнена по принципу сборных элементов, устанавливаемых друг в друга. Такое решение позволяет значительно сократить время монтажа опорных элементов и повысить удобство транспортировки оборудования. Кроме того, криволинейная форма опорной поверхности способствует более равномерному распределению нагрузок не только непосредственно под опорой, но и на прилегающих участках грунта.

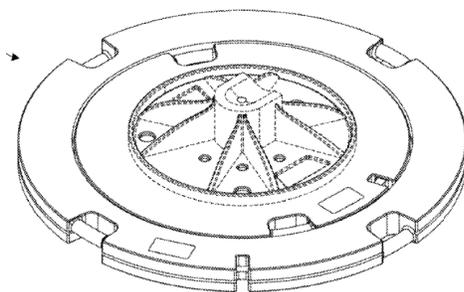


Рисунок.1. Эргономичная стабилизирующая накладка

Второе направление развития конструкций выносных опор связано с изменением конфигурации и геометрии опорных плит.

Так, в патенте [11] предложена конструкция опорной плиты с двухслойной структурой, позволяющей повысить жесткость элемента при относительно небольшой массе конструкции при восприятии значительных нагрузок.

В ряде технических решений рассматриваются варианты увеличения площади опоры за счет применения складывающихся элементов. Например, в патенте [12] опорная плита снабжена двумя шарнирно закрепленными крыльями, которые могут поворачиваться на угол до 180. В рабочем положении данные элементы образуют дополнительную опорную поверхность, что позволяет увеличить площадь контакта с грунтом и снизить удельное давление на основание. Аналогичный подход реализован в патенте [13] где увеличение площади опорной поверхности достигается за счет использования складывающихся секций опорного элемента. Подобные решения направлены на обеспечение компактности конструкции в транспортном положении при одновременном увеличении площади опоры в рабочем режиме.

Интересное техническое решение представлено в патенте [14], где опорный элемент оснащен съемным сферическим основанием. Такая конструкция обеспечивает более равномерное распределение нагрузок на опорную поверхность и позволяет компенсировать неровности основания.

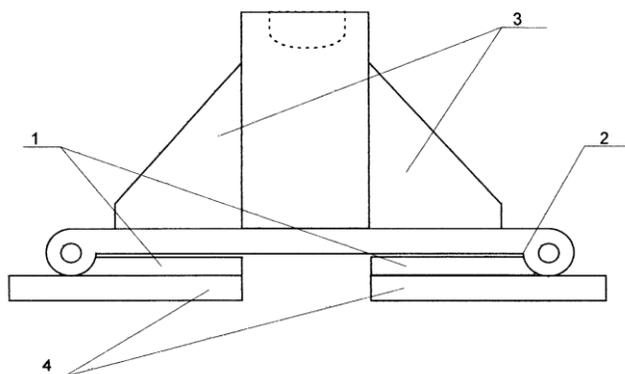


Рисунок 2. Опорная плита

Третьим направлением совершенствования выносных опор является использование новых конструкционных материалов.

В патенте [15] предложена конструкция опорной накладки, выполненной в виде сборной стальной полый структуры, обладающей высокой несущей способностью при относительно небольшой массе. Использование подобных элементов позволяет снизить трудоемкость транспортировки и установки опорных устройств, что особенно важно при проведении аварийно-восстановительных работ на железнодорожном транспорте.

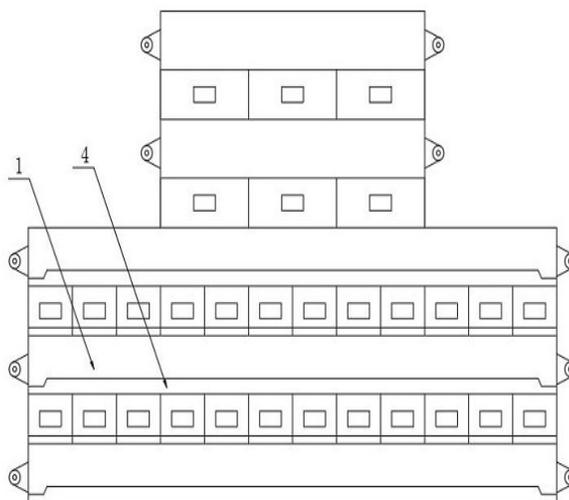


Рисунок 3. Высокопрочная стальная накладка

В последние годы значительное внимание уделяется применению композитных материалов. В частности, в патенте [16] рассматривается возможность изготовления опорных элементов из композитных материалов на основе углеродного волокна и эпоксидных связующих. Использование таких материалов позволяет уменьшить массу

конструкции при сохранении достаточного уровня прочностных характеристик.

Результаты исследований [17,18] показывают, что элементы конструкций грузоподъемных машин, выполненные из угле- и стекловолоконных материалов, могут иметь механические характеристики, сопоставимые со стальными конструкциями, при существенно меньшей массе.

В результате исследования [17], получено, что конструктивные элементы крана, изготовленные из углеродного и стекловолокна имеет механические характеристики на уровне образцов из стали, но меньше их на 20%, что открывает новые возможности использования инновационных материалов в конструкциях грузоподъемных кранов. Подобный вывод подтверждается в исследовании [18] где кран спроектирован из угле и стекловолокна, имеет характеристики, сопоставимые с кранами, изготовленными из стали.

Производственные испытания образцов выносной опоры (пирамидальная подставка в сборе), изготовленных из композитного материала - нейлона МС (cast nylon), по сравнению со стальными или алюминиевыми образцами, показали результаты, что быстроразъемные выносные опоры имеют небольшой удельный вес (только 1,138 г/см³, что на 1/7 состоят из стали и на 2/5 из алюминиевого сплава), не гигроскопичен, легко монтируется и транспортируется обслуживающим персоналом из двух человек [19].

В нормативных документах [20] и работе [21] приводятся материалы к механическим характеристикам композитных материалов (углепластиков), которые показывают перспективность их практического использования в машиностроении для изготовления рабочих узлов и элементов опорных механизмов железнодорожных кранов.

Практический интерес представляет также применение полимерных материалов. Так, результаты экспериментальных исследований показали, что элементы выносных опор, изготовленные из литого нейлона (МС nylon), обладают малой плотностью, высокой износостойкостью и достаточной прочностью. Это позволяет значительно облегчить монтаж и транспортировку опорных устройств [19].

Четвертым направлением развития является разработка устройств контроля нагрузки на опоры.

В практике эксплуатации железнодорожных кранов наблюдение за положением машины и состоянием опор часто осуществляется с помощью простейших устройств, например жидкостных уровней. Однако такие средства не позволяют объективно оценивать распределение нагрузок между опорами. В связи с этим в ряде патентных решений предлагается использовать датчики давления и системы мониторинга нагрузки. Например, в патенте [22] предложена конструкция опорной плиты, оснащенной датчиком давления, позволяющим измерять нагрузку, передаваемую на грунт. При превышении допустимых значений система может сигнализировать оператору о возникновении опасной ситуации.

В работах [23,24] предложены измерительные устройства, основанные на использовании деформируемых элементов с датчиками усилий. Подобные системы позволяют регистрировать нагрузку на каждую опору и могут быть интегрированы в автоматизированные системы управления краном.

Проведенный анализ патентных источников позволяет сделать вывод о том, что основные направления совершенствования конструкций выносных опор железнодорожных кранов связаны с решением следующих инженерных задач:

- увеличение площади опорной поверхности и снижение удельного давления на грунт;

- совершенствование геометрии опорных элементов для более равномерного распределения нагрузок;

- применение новых материалов с целью снижения массы конструкции;

- внедрение систем контроля нагрузок и устойчивости крана.

Полученные результаты послужили основой для последующего морфологического анализа конструкций выносных опор и разработки предложений по совершенствованию их конструктивных схем[25].

Сущность данного метода заключается в представлении исследуемого объекта в виде совокупности функциональных элементов, каждый из которых может иметь несколько альтернативных вариантов реализации. Формирование морфологической таблицы позволяет определить возможные комбинации конструктивных решений и выявить перспективные направления развития технической системы.

В рамках настоящего исследования конструкция выносной опоры железнодорожного крана была рассмотрена как система, включающая несколько основных функциональных элементов:

- конструктивная схема опоры;
- тип опорного основания;
- способ соединения элементов;
- технология изготовления;
- материал конструкции;
- характер распределения давления на грунт;
- способ контроля устойчивости.

Таблица 1. Морфологическая классификация системы выносных опор железнодорожного крана

Функциональный элемент	Варианты конструктивных решений				
Тип конструкции выносной опоры (А)	А ₁ - стационарные	А ₂ -съёмные опоры	А ₃ - выдвигные опоры	А ₄ - поворотные опоры	А ₅ – комбинированные опоры
Конструкция опорного основания (Б)	Б ₁ -плоская опорная плита	Б ₂ -круглая опора	Б ₃ - сферическое основание	Б ₄ - складная опорная плита	Б ₅ - пирамидальная
Способ крепления элементов (В)	В ₁ - болтовое соединение	В ₂ -втулочное соединение	В ₃ - шарнирное соединение		
Технология изготовления (Г)	Г ₁ -литье	Г ₂ -сварная конструкция	Г ₃ - механическая обработка	Г ₄ -комбинированная технология	

Материал конструкции (Д)	Д ₁ -конструкционная сталь	Д ₂ -алюминиевые сплавы	Д ₃ -полимерные материалы	Д ₄ -композитные материалы	Д ₅ -комбинированные материалы
Характер распределения давления на грунт (Е)	Е ₁ - плоское распределение давления	Е ₂ -распределение через демпфирующие элементы	Е ₃ -распределение через модульные опорные элементы		
Способ контроля устойчивости (Ж)	Ж ₁ -визуальный контроль	Ж ₂ автоматизированный контроль с использованием датчиков			

Сформированная морфологическая таблица отражает основные конструктивные признаки выносных опор и позволяет рассмотреть широкий спектр возможных комбинаций технических решений.

На основе анализа патентных решений и эксплуатационных требований к железнодорожным кранам была сформирована одна из возможных комбинаций конструктивных признаков, характеризующая перспективную конструкцию выносной опоры Таблица 2.

Таблица 2.- Морфологическая комбинация конструкции выносной опоры

Ж ₁	Е ₁	Д ₅	Г ₁	В ₂	Б ₅	Б ₃
----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------

где: Ж₁ – визуальный контроль, Е₁ – плоское распределение давления, Д₅ – Комбинированные материалы, Г₁- технология литья, В₂-втулочное соединение, Б₅ – пирамидальная подставка, А₃ – выдвижная конструкция опоры

Полученная комбинация характеризует конструкцию выносной опоры, включающую выдвижную опорную балку, опорное основание пирамидальной формы и элементы, выполненные из комбинированных материалов. Применение подобной конструктивной схемы позволяет увеличить площади опорной поверхности, улучшить распределение нагрузок на грунт и повысить устойчивость крана в процессе работы.

Использование морфологического анализа позволяет систематизировать существующие конструктивные решения и определить возможные комбинации параметров выносных опор, обеспечивающие повышение устойчивости железнодорожных

кранов в эксплуатационных условиях.

На основании анализа функциональных признаков конструкций выносных опор железнодорожных кранов можно сделать вывод, что основными инженерными решениями, направленными на улучшение их эксплуатационных характеристик, являются мероприятия, обеспечивающие снижение удельного давления опор на грунт. Это достигается за счет увеличения площади опорных элементов и улучшения сцепных свойств их контактной поверхности, а также за счет совершенствования вспомогательных опорных устройств.

Перспективным направлением повышения эксплуатационных свойств железнодорожных кранов является использование в элементах конструкции выносных опор современных композитных материалов, таких как углеволокно, стекловолокно и углепластики. Применение опорных устройств и стабилизаторов, изготовленных из данных материалов с учетом свойств грунтового основания, позволяет снизить массу конструкции и повысить её прочностные и эксплуатационные характеристики.

Рассмотрение известных конструкций выносных опор позволяет определить их основные геометрические и силовые параметры, оценить эффективность различных схем раскрепления и выявить потенциальные направления для повышения устойчивости крана. Кроме того, анализ существующих решений создаёт основу для последующей разработки предложений по оптимизации опорного оборудования и уточнения расчётных моделей, применяемых при оценке устойчивости железнодорожных кранов.

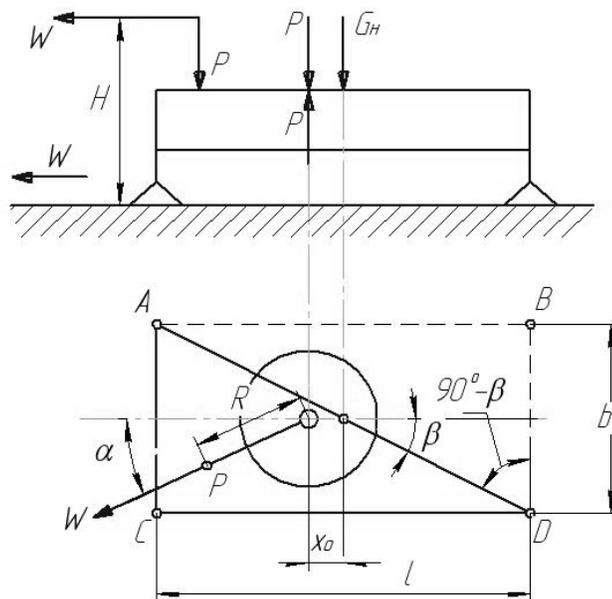


Рисунок 4. Схема расчета опорных нагрузок

где, G_n - вес не поворотной части крана; P - сила действующая на поворотную часть; R - радиус точка приложения силы относительно оси вращения; α - угол отклонения стрелы от оси к горизонту; β - угол отклонения стрелы от оси; x_0 - расстояния от центра симметрии; W - ветровые и инерционные составляющие силы; H - высота от основания крана.

При расчете устойчивости железнодорожных кранов применяются общепринятые методики. Одной из таких методик является расчет устойчивости по методу [26], в соответствии с которым условие устойчивости рассматривается на основе нормативных

требований с использованием методов кинестатики с учетом дополнительных усилий от динамических составляющих. В данном случае расчёт выполняется по схеме четырехопорной жесткой системы с учетом упругих свойств элементов конструкции, однако без учёта реологических свойств грунтового основания.

Общая структура методики расчета устойчивости стреловых кранов различных модификаций при работе как с выносными опорами и без них рассмотрена в отраслевых литературных источниках[27–29]. Следует отметить, что основные мероприятия по обеспечению безопасной эксплуатации железнодорожных кранов изложены в нормативных документах, отраслевых положения и инструкциях заводов –изготовителей, а также в классических методиках расчета. Основы теоретических исследований базируются на учёте допускаемых силовых факторов, включающих статические и возможные динамические нагрузки, а также характеристика опорных площадок и условий эксплуатации. Ниже приведена общепринятая расчетная схема (Рис.4) устойчивости стреловых кранов, при работе четырех колесах или на выносных опорах[26].

Причем, значения реакции в точке, который рассматривается определяющая условия устойчивости, рассчитывается по выражению[26]:

$$\begin{aligned} A &= \frac{G_H}{4} + P \frac{l/2 + x_0}{2l} + M \frac{\cos \alpha}{2l} - M \frac{\sin \alpha}{2b}; \\ B &= \frac{G_H}{4} + P \frac{l/2 - x_0}{2l} - M \frac{\cos \alpha}{2l} - M \frac{\sin \alpha}{2b}; \\ C &= \frac{G_H}{4} + P \frac{l/2 + x_0}{2l} + M \frac{\cos \alpha}{2l} + M \frac{\sin \alpha}{2b}; \\ D &= \frac{G_H}{4} + P \frac{l/2 - x_0}{2l} - M \frac{\cos \alpha}{2l} + M \frac{\sin \alpha}{2b}. \quad (1) \\ C_{max} &= \frac{G_H}{4} + P \frac{l/2 + x_0}{2l} + M \frac{b}{2l\sqrt{l^2 + b^2}} + M_2 \frac{l}{2b\sqrt{l^2 + b^2}} \quad (2) \end{aligned}$$

В основу положена расчетная схема с учетом рекомендации [30]. Сначала выполняется расчет нагрузок на выносные опоры в виде реакции опор под каждой выносной опорой. Затем площадь опорной поверхности мата выносной опоры, контактирующей с грунтом, используется для определения давления, передаваемого этой выносной опорой на основание. Величина реакций и давление под выносными опорами зависят от трех факторов γ , θ и β , и определяются согласно уравнениям (3), (4) и (5).

$$\gamma = \frac{W_s + W_c}{4w_m l_m} \quad (3)$$

$$\phi = \frac{W_s d_s \sin \theta_s + W_c d_s \sin \theta_s}{B_c w_m l_m} \quad (4)$$

$$\beta = \frac{W_s d_s \cos \theta_s + W_c d_s \cos \theta_s + (W_s + W_c) x_0}{L_c w_m l_m} \quad (5)$$

где W_c = вес несущей конструкции; W_s - вес пролетного строения; d_s = расстояние по горизонтали от оси вращения несущей конструкции до оси; d_s - вращения крана (положительное в переднем направлении); x_0 - расстояние по горизонтали от оси вращения

пролетного строения до оси вращения крана; L_c -расстояние между выносными опорами в продольном направлении (от центра до центра); B_c -расстояние между выносными опорами от центра; θ_s - угол между центром тяжести надстройки и осью x ; θ_c - угол наклона несущего зубчатого колеса; B_c - ширина мата; l_m - длина мата.

Нагрузка на каждую выносную опору с учетом использования опорной плиты выполняется по уравнениям (6), (7), (8) и (9) [30].

$$GBP_{\text{(прав.передн)}} = \gamma + \frac{1}{2}(\phi - \beta)(6)$$

$$GBP_{\text{(лев.передн)}} = \gamma - \frac{1}{2}(\phi + \beta)(7)$$

$$GBP_{\text{(прав.задн)}} = \gamma + \frac{1}{2}(\phi + \beta)(8)$$

$$GBP_{\text{(лев.задн)}} = \gamma - \frac{1}{2}(\phi - \beta)(9)$$

где, GBP- опорное давление на грунт

Преимущество этого метода заключается в том, что он позволяет определить значения углов α , соответствующих максимальным значениям опорных реакций, что является критически важным для условий эксплуатации. Для тяжелых кранов, используемых в аварийно-восстановительных работах железнодорожных кранов, рекомендуется увеличить количество опорных точек, что должно повысить их устойчивость. Однако, на практике, например, в железнодорожных кранах ЕДК-2000, этот вопрос решается увеличением расстояния между опорными площадками.

Причинами потери устойчивости железнодорожных кранов является совокупность случайных трудно прогнозируемых факторов, включая ненормативные режимы нагружения, конструктивные и технологические особенности опорных устройств, подкрановых площадок. К числу подобных факторов относятся динамические нагрузки, возникающие при работе крана в режимах подъема и опускания груза, инерционные воздействия грузов, а также ветровые нагрузки. Оценка возможной потери устойчивости кранов выполняется на основе принятых расчетных схем по критериям опрокидывания в сторону груза или в сторону противовеса, с учетом пространственного положения стрелы. Для решения данной задачи применяются различные математические модели, основанные на составлении уравнения моментов относительно ребра опрокидывания, которое в общем виде записывается следующим образом [26]:

$$M_{кр} = \sum_{i=1}^n M_i(F_i) \quad (10)$$

где, $M_{кр}$ - момент от эксплуатационного (собственный вес крана, противовеса) веса крана;

$\sum M_i$ - сумма моментов от всех сил F_i , действующих на кран.

На основании рассмотренной методики ниже приведен расчет устойчивости железнодорожного крана ЕДК-2000 для оценки применимости принятой методики с учетом особенности использования железнодорожных кранов в условиях эксплуатации.

Результаты и обсуждение

Для анализа устойчивости рассматриваемого крана ЕДК-2000 в работе выполнен расчет по данной методике, основанный на использовании основных параметров крана и его максимальной грузоподъемности, приведенных в техническом паспорте. Исходные данные крана для расчета представлены в таблице 3.

Таблица 3. Конфигурация железнодорожного крана (ЕДК-2000)

Описание	параметры
Масса крана	260 т
Масса груза	100 т
Вылет стрелы	19 м
Высота подъема крюка	17 м
Расстояние между передними и задними опорами	8500 м
Расстояние между левыми и правыми опорами	7500 м
Координаты центра тяжести крана	15,22 м
Размер опорной плиты	2,5× 3,2 м
Количество опор	4
Допустимое давление грунта	200 кПа

В результате проведенных расчетов получены следующие значения реакций выносных опор: R1- передняя левая опора 2204 кН; R2-передняя правая опора -2204 кН; R3-задняя правая опора-438 кН; R4-задняя левая опора-438 кН. Давление на грунт определено при следующих параметрах: площадь опорной плиты $A= 8 \text{ м}^2$, максимальная реакция $R_{\max}=2204 \text{ кН}$. Удельное давление $p=276 \text{ кПа}$, при допустимом давлении $p=200 \text{ кПа}$.

Таблица 4. Реакции опор

опоры	реакции опор
R1- передняя левая опора	2204 кН
R2-передняя правая опора	2204 кН
R3-задняя правая опора	-438 кН
R4-задняя левая опора	-438 кН.

Таким образом, в предлагаемой работе в качестве объекта исследования устойчивости железнодорожных кранов выполнен краткий анализ исследования по устойчивости железнодорожных кранов с выносными опорами.

Анализ предварительных расчетов устойчивости железнодорожных кранов показал, что реакции выносных опор (таблица 4) для базового варианта железнодорожного крана ЕДК-2000 имеют значения, превышающие допустимое давление на грунт.

Из полученных данных можно заключить, что для принятых условий характерно неравномерное распределение нагрузок по выносным опорам. Максимальное значение реакций опор наблюдается на передних опорах и составляет $R_{\max}=2204$ кН при нагрузке $Gg=981$ кН.

При данных условиях существует вероятность отрыва задних опор, что может привести к опрокидыванию крана в сторону подъема груза. При площади опорной плиты $A=8$ м² удельное давление составляет, $p=276$ кПа при допустимом значении $p=200$ кПа.

Полученные результаты расчетов свидетельствуют о превышении нормативного значения удельного давления на грунт для крана ЕДК-2000, что может стать причиной нарушения устойчивости крана в условиях эксплуатации. В соответствии с нормативными данными допускается превышение удельного давления для кранов до 800 кПа.

Однако снижение значений сил реакции задних правой и левой опор свидетельствует о вероятности нарушения устойчивости крана при появлении дополнительных динамических нагрузок. К таким нагрузкам относятся инерционные воздействия при работе, ветровые нагрузки, а также влияние реологических свойств грунта на реакцию опор.

В расчетах выносных опор кранов влияние деформируемости основания обычно учитывается через упругопластическую модель грунта Винклера, согласно которой реакция опоры определяется не только статическим состоянием крана, но и осадкой опоры [4]. Последняя оказывает влияние на устойчивость крана, вследствие дополнительного изменения угла опорной плоскости выносных опор, что согласуется с данными исследований [4,30].

Приведенные данные показывают, что учет нелинейной модели основания приводит к изменению угла наклона опорной системы и подтверждает необходимость учета данного фактора при разработке инженерных мероприятий.

Исходя из полученных результатов исследования устойчивости крана, необходимо разработать расчетную динамическую модель железнодорожных восстановительных кранов с учетом структуры грунта и влияния динамических нагрузок на их устойчивость.

В целом рассмотренные исследования отражают значительный прогресс в области моделирования и оптимизации, однако недостаточно внимания уделяют практическим ограничениям взаимодействию опорных систем с грунтом, динамическим воздействиям и специфике эксплуатации железнодорожных кранов. Указанные пробелы определяют необходимость дальнейших исследований, ориентированных на реальные условия эксплуатации и конструктивные особенности специализированных опорных систем.

Заключение

В результате исследования, одним из решающих конструктивных элементов, определяющих устойчивость и эксплуатационную надёжность железнодорожных кранов, являются выносные опоры, которые воспринимают основную часть нагрузки в рабочем режиме и формируют опорный контур крана.

Перспективные направления совершенствования конструкций современных выносных опор железнодорожных кранов могут быть систематизированы по следующим четырем основным группам:

- разработка конструкций опорных устройств для снижения удельного давления на

грунт за счет увеличения площади опорных элементов и улучшения сцепных свойств контактной поверхности;

совершенствование геометрии и конструктивной конфигурации опорных элементов, обеспечивающих более эффективное распределение нагрузок;

- использование современных композитных материалов при изготовлении элементов выносных опор, позволяющих снизить массу конструкции при сохранении необходимой прочности и жёсткости;

- разработка диагностических устройств для контроля нагрузки на опоры и мониторинга устойчивости крана в процессе эксплуатации.

На основании анализа ключевых технических параметров и эксплуатационных свойств опорных систем разработана морфологическая матрица, позволяющая определить возможные направления их дальнейшей оптимизации опорных устройств.

Указанные обстоятельства определяют необходимость дальнейших исследований, направленных на разработку более совершенных конструктивных решений выносных опор, а также на уточнение расчётных моделей устойчивости железнодорожных кранов.

Установлено, что перспективным направлением дальнейших исследований является разработка расчётной динамической модели устойчивости железнодорожных кранов, учитывающей геометрию опорного контура, характеристики грунтового основания и динамические нагрузки, возникающие при выполнении грузоподъёмных операций.

Вклад авторов

Хайытбаева Г. Б. - постановка научной задачи, сбор и анализ теоретических данных, написание основного текста статьи, координировала работу коллектива авторов.

Мурзагалиев А.Ж. — редактирование текста статьи, участие в обсуждении результатов и формулировании инженерных рекомендаций.

Сазамбаева Б. Т.- анализ и интерпретация результатов работы, написание текста и критический пересмотр его содержания.

Ордабаева Г.М. - подготовила таблицы, приведенные в статье, проанализировала результаты.

Косыбаев Ж.З.- анализ и интерпретация результатов работы.

Список литературы

1. Правила предоставления кранов на железнодорожном ходу, техники и других технических средств восстановительных поездов акционерного общества «Национальная компания «Қазақстан темір жолы». Нур-султан, 2019. - 20 с.- Нормативный документ.
2. Хайытбаева Г.Б., Сазамбаева Б.Т., Болатова А.Б. Обзор конструкций и дефектов узлов железнодорожных кранов. Вестник ЕНУ им. Гумилева. Серия: Технические науки и технологии, 2025. - №1 (150). – С.162–72. Научная статья на казахском языке. DOI: 10.32523/2616-7263-2025-150-1-162-172
3. Томилин И.П., Новиков Г.И. Краны типа ЕДК. Устройство и эксплуатация. Москва: М: УМК МПС России; 2000. -157 с. – учебное пособие
4. Ватулин Я.С., Потахов Д.А. Моделирование взаимодействия элементов опорного контура железнодорожного грузоподъемного крана с грунтовой опорной

- поверхностью. Известия ПГУПС. 2019. -№1(16) .- С.59-67. Научная статья. DOI:<https://doi.org/10.20295/1815-588X-2019-1-59-67>
5. Андриенко Н.Н. Стреловые самоходные краны. Одесса: Астропринт; 2001. - 706 с. книга
 6. Jang H, Lee Y, Lee H, Cha Y, Choi S, Park J. (2024). Preventing Overturning of Mobile Cranes Using an Electrical Resistivity Measurement System. Applied Sciences (Switzerland). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI), 14 (21), p.1-19. Научная статья на англ.языке. <https://doi.org/10.3390/app14219623>
 7. Пенчук В.А, Водолажченко А.Г., Горулёв А.Ю. Классификация и эффективность применения выносных опор наземных транспортно-технологических машин. Современное промышленное и гражданское строительство. 2019.№4(15). – С.179–89. – научная статья
 8. Koberg Richard. Stabilizer pad and handle apparatus. pat. US 2014/0319315 A1/ applicant Guthrie Center. – Publ.30.10.2014. (патент на англ. языке)
 9. Jefferson Steiner. Outrigger stabilizer pad having a frictional surface. pat. US 2019/0210574 A1. / applicant BigFoot Construction Equipment,Inc. - publ. 11.07.2019. (патент на англ. языке)
 10. Paul S. Perkins, Downers Grove. Stabilizer pad and assembly. pat. US 012209378B2 / applicant Raptor Tech, Inc. - publ. 28.01.2025. (патент на англ. языке)
 11. Лян Яхуа, Ян Юнхуа, Фан Бо, Лу Юнчжи, Дай Цзинсюань. Опорная плита. Пат. CN 208308284 U. 01.01.2019. (патент на китайском языке)
 12. Коробейников М.С, Жигайло В.В, Смирнов В.И. Увеличение площади опорной поверхности выносных опор. Пат. RU 215250, МПК В66С 23/78. - 06.12.2022.
 13. Ли Аньцян, У Горуй, Чжан Вэй. Опорная плита для крана. Пат. CN 208308284 U. 01.01.2019. (патент на китайском языке)
 14. Фант Чжаомин Ли Биюй. Крановые опоры и подъемные краны. CN 203558721U. 23.04.2014. (патент на китайском языке)
 15. Вэй Чуньсин, Лю Цюань, Чжан Цзяньцзюнь, Чжан Лян, Ли Биджу. Опорная плита и подъемное оборудование. Пат. CN 102862914 А. 09.01.2013. (патент на китайском языке)
 16. Ша Чжицян, Ся Чжунцянь, Шэнь Син, Хо Яньхун, Ли Цяньхай, У Конгган Хуань Цзичунь, et al. Высокопрочная стальная подложка. Пат. CN 112456355А. 09.03.2021. (патент на китайском языке)
 17. Tulekov A, Togizbayeva B, Kenesbek I, Kenesbek A, Zabiyeva A.(2023). The Use of Composite Materials in the Production of Tower Cranes. Acta Polytechnica Hungarica. 20(9). 277-291. Научная статья на англ.языке. DOI: 10.12700/APH.20.9.2023.9.16
 18. Solazzi L, Vaccari M. (2022). Feasibility study of a jib crane made of composite materials considering deterministic and probabilistic approach. Composites Part C: Open Access. 9(12). 1-16. Научная статья на англ.языке. DOI: 10.1016/j.jcomc.2022.100323
 19. Сюй Цзюнь Лю Чжэньин. (2022) Исследование опорных элементов для спасательного железнодорожного крана. Machine Chine. №29.P.95–98. - Научная статья на китайском языке.
 20. Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. Волокна углеродные. Общие технические требования и методы испытаний. Москва,

- Стандартинформ. 2020. – 15 с. - Нормативный документ
21. Колобков А. Развитие технологий получения углеродных волокон (обзор). Композиционные материалы. Труды ВИАМ № 8 (114). 2022. С.123-131. – научная статья. DOI:<https://doi.org/10.18577/2307-6046-2022-0-8-123-131>
 22. Юй Дэхай, Ян Ган, Ли Сянган, Ван Минь Шунь. Сигнализатор опрокидывания для выносных опор и строительной техники. Пат. CN 103359080 А. 23.10.2013. (патент на китайском языке)
 23. Reinhold Ost, Klaus Haerle, Stefan Amendt. Measurement system for determining support force. pat.US 010308487B2; - publ. 04.06.2019. (патент на англ. языке)
 24. John F. Benton, Matthew T. Oswald, Stephen J.Schoonmaker. Outrigger pad monitoring system. pat.US 20140116975 A1. - publ. 01.05.2014. (патент на англ. языке)
 25. Кадыров А.С, Кадырова И.А. Основы научных исследований: Монография. Караганда: КарГТУ; 2015. – 278с. – книга
 26. Вайнсон А.А. Подъемно-транспортные машины. Москва: Машиностроение; 1989. – 536 с. – книга
 27. Шеффлер М, Пайер Г, Курт Ф. Основы расчета и конструирования подъемно-транспортных машин. Москва: Машиностроение; 1980. – 255 с. – книга
 28. А.И. Дукельский. Справочник по кранам. Том 1. Ленинград: Машиностроение; 1971. – 400с. – книга
 29. Shapiro L.K., Shapiro J.P. Cranes and Derricks. McGraw-Hill Companies. Fourth Edition. 2010. p.637. - книга на англ. языке.
 30. Ali GM, Mansoor A, Liu S, Olearczyk J, Bouferguene A, Al-Hussein M. (2021). Simulation of ground bearing pressure profile under hydraulic crane outrigger mats for the verification of 16-point combined loading. Procedia Computer Science 180(3). p.482–491. Научная статья на англ. языке. DOI: 10.1016/j.procs.2021.01.264

**Г.Б. Хайытбаева^{1*}, А.Ж.Мурзагалиев², Б.Т.Сазамбаева¹, Г.М.Ордабаева²
Ж.З.Косыбаев¹**

¹Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия Ұлттық Университеті, Астана, Қазақстан.

²Қ.Жұбанов атындағы Ақтөбе өңірлік университеті, Ақтөбе, Қазақстан

Теміржол крандарының шығатын тіректерінің конструкциясын дамыту перспективалары

Аңдатпа. Мақалада теміржол қалпына келтіру крандарының тұрақтылығы мен пайдалану қауіпсіздігін қамтамасыз ету мәселесі қарастырылған. Тиеу-тасымалдау операцияларын орындау кезінде кранның тұрақтылығын анықтайтын негізгі түйіндерінің бірі күш жүктемелерінің негізгі бөлігін қабылдайтын және тірек бетіне қайта бөлуді қамтамасыз ететін шығатын тіректер болып табылады. Зерттеудің мақсаты теміржол жүк көтергіш крандарының шығатын тіректерінің сындарлы шешімдерін талдау және оларды сындарлы жетілдірудің перспективалық бағыттарын негіздеу болып табылады. Қолданыстағы техникалық шешімдерді патенттік талдау негізінде қазіргі заманғы шығатын тіректердің конструкцияларын мынадай топтарға жіктеу ұсынылды: топыраққа үлестік қысымды төмендетуге арналған жүйелер; конфигурациясы мен орналасуы

бойынша ерекшеленетін конструкциялар; жұмыс элементтерінде заманауи материалдарды пайдалануды көздейтін шешімдер; жұмыс процесінде кранның тұрақтылығын бақылау құрылғыларымен жабдықталған жүйелер. Бөлінген жіктеу белгілерінің негізінде қашықтағы тіректерді конструктивті орындаудың мүмкін нұсқаларын синтездеуге, әрі қарайғы зерттеулердің бағытын негіздеуге және зерттеу объектісінің негізгі параметрлерін анықтауға мүмкіндік беретін морфологиялық кесте құрылды. Шығатын тіректері бар теміржол крандарының тұрақтылығын есептеудің қолданыстағы әдістемелеріне салыстырмалы талдау жүргізілді. Олардың конфигурациясын оңтайландыру және заманауи композиттік материалдарды қолдану арқылы тірек элементтерінің тиімділігін арттыру перспективасы көрсетілген.

Түйін сөздер: теміржол крандары, шығатын тіректер, тұрақтылық, аутригер, композитті материалдар, морфологиялық жіктеу, тірек реакциялары, есептеу схемасы.

**G.B. Khayitbayeva¹, A.J. Murzagaliev², B.T. Sazambayeva¹, G.M. Ordabayeva²
Zh. Kossybayev¹**

¹*L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan.*

²*Aktobe Regional University named after K. Zhubanov, Aktobe, Kazakhstan.*

Prospects for the development of the outrigger designs for railway cranes

Abstract. This article examines the issue of ensuring the stability and operational safety of railway recovery cranes. It demonstrates that one of the key components determining the crane's stability during loading and transport operations is the outriggers, which absorb the majority of the forces and ensure their redistribution to the supporting surface. The aim of the study is to analyze the design solutions for outriggers of railway lifting cranes and to identify promising directions for their design improvement. Based on a patent analysis of existing technical solutions, a classification of modern outrigger designs has been developed into the following groups: systems designed to reduce unit pressure on the ground; designs differing in configuration and layout; solutions involving the use of modern materials in working elements; systems equipped with devices for monitoring crane stability during operation. Based on the identified classification criteria, a morphological table was created, allowing for the synthesis of possible design variants for outriggers, justifying the direction of further research, and determining the main parameters of the research object. A comparative analysis of existing methods for calculating the stability of railway cranes with outriggers has been carried out. The prospect of increasing the efficiency of the support elements by optimizing their configuration and using modern composite materials is shown.

Keywords: railway cranes, outriggers, stability, outrigger, composite materials, morphological classification, support reactions, calculation model.

References

1. Pravila predostavlenija kranov na zheleznodorozhnom hodou, tehniki i drugih tehniceskikh sredstv vosstanovitel'nyh poezdov akcionernogo obshhestva «Nacional'naja kompanija

- «Қазақстан темір жолы». Nur-sultan, 2019. - 20 с.- [in Russian].
2. G.B.Khaiytbayeva, B.T.Sazambayeva, A.B.Bolatova. Overview of designs and defects of railway cranes. Vestnik ENU im. Gumilyova. Technical sciences and technology series, 2025. -№1 (150). – p.162–72. Scientific article [in Kazakh]. DOI: [10.32523/2616-7263-2025-150-1-162-172](https://doi.org/10.32523/2616-7263-2025-150-1-162-172)
 3. Tomilin I.P., Novikov G.I. Krany tipa EDK. Ustrojstvo i jekspluatacija. Moskva: M: UMK MPS Rossia; 2000. -p.157. – textbook [in Russian].
 4. Vatulin Ja.S., Potahov D.A. Modelirovanie vzaimodejstvija jelementov opornogo kontura zheleznodorozhnogo gruzopodiemnogo krana s gruntovoi opornoj poverhnostiu. Izvestia PGUPS. 2019. -№1(16) .- p.59-67. Scientific article [in Russian]. DOI:<https://doi.org/10.20295/1815-588X-2019-1-59-67>
 5. Andrienko N.N. Strelovye samohodnye krany. Odessa: Astroprint; 2001. - 706 p. textbook [in Russian].
 6. Jang H, Lee Y, Lee H, Cha Y, Choi S, Park J. (2024). Preventing Overturning of Mobile Cranes Using an Electrical Resistivity Measurement System. Applied Sciences (Switzerland). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI), 14 (21), p.1-19. Scientific article. [in English] <https://doi.org/10.3390/app14219623>
 7. Penchuk V.A, Vodolazhchenko A.G., Goruliov A.Ju. Klassifikacija i ieffektivnost primeneniya vynosnyh opor nazemnyh transportno-tehnologicheskikh mashin. Sovremennoe promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo. 2019.№4(15). – p.179–89. – Scientific article [in Russian].
 8. Koberg Richard. Stabilizer pad and handle apparatus. pat. US 2014/0319315 A1/ applicant Guthrie Center. – Publ.30.10.2014. patent [in English].
 9. Jefferson Steiner. Outrigger stabilizer pad having a frictional surface. pat. US 2019/0210574 A1. / applicant BigFoot Construction Equipment, Inc. - publ. 11.07.2019. patent [in English].
 10. Paul S. Perkins, Downers Grove. Stabilizer pad and assembly. pat. US 012209378B2 / applicant Raptor Tech, Inc. - publ. 28.01.2025. patent [in English].
 11. Lian Jahua, Jan Junhua, Fan Bo, Lu Junchzhi, Daj Czinsjuan'. Opornaia plita. Pat. CN 208308284 U. 01.01.2019. patent [in Chinese]
 12. Korobeinikov M.S, Zhigailo V.V, Smirnov V.I. Uvelichenie ploshhadi opornoj poverhnosti vynosnyh opor. Pat. RU 215250, МПК B66C 23/78. - 06.12.2022. [in Russian].
 13. Li An'cian, U Gorui, Chzhan Vjei. Opornaia plita dlia krana. Pat. CN 208308284 U. 01.01.2019. patent [in Chinese]
 14. Fant Chzhaomin Li Bijuj. Kranovye opory i podiemnye krany. Pat.CN 203558721U. 23.04.2014. patent [in Chinese]
 15. Viei Chun'sin, Liu Ciuan', Chzhan Czjan'czjun', Chzhan Lian, Li Bidzhu. Opornaia plita i podiemnoe oborudovanie. Pat. CN 102862914 A. 09.01.2013. patent [in Chinese]
 16. Sha Chzhicjan, Sja Chzhuncjan', Shjen' Sin, Ho Jan'hun, Li Cjan'haj, U Konggan Huan' Czichun', et al. Vysokoprochnaja stal'naja podlozhka. Pat. CN 112456355A. 09.03.2021. patent [in Chinese]
 17. Tulekov A, Togizbayeva B, Kenesbek I, Kenesbek A, Zabiyeva A.(2023). The Use of Composite Materials in the Production of Tower Cranes. Acta Polytechnica Hungarica. 20(9). 277-291. Scientific article [in English]. DOI: [10.12700/APH.20.9.2023.9.16](https://doi.org/10.12700/APH.20.9.2023.9.16)

18. Solazzi L, Vaccari M. (2022). Feasibility study of a jib crane made of composite materials considering deterministic and probabilistic approach. *Composites Part C: Open Access*. 9(12). 1-16. Scientific article [in English]. DOI: [10.1016/j.jcomc.2022.100323](https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2022.100323)
19. Siui Cziun' Lju Chzhjen'in. (2022) Issledovanie opornyh ielementov dlja spasatel'nogo zheleznodorozhnogo kрана. *Machine Chine*. №29. P.95–98. - Scientific article [in Chinese]
20. Federal'noe agentstvo po tehničeskomu regulirovaniju i metrologii. *Volokna uglerodnye. Obshhie tehničeskie trebovaniya i metody ispytaniy*. Moskva, Standartinform. 2020. – 15 c. - [in Russian].
21. Kolobkov A. Razvitie tehnologij poluchenija uglerodnyh volokon (obzor). *Kompozicionnye materialy. Trudy VIAM № 8 (114)*. 2022. C.123-131.–Scientific article [in Russian]. DOI:<https://doi.org/10.18577/2307-6046-2022-0-8-123-131>
22. Juj Djehaj, Jan Gan, Li Sjangan, Van Min' Shun'. Signalizator oprokidyvaniya dlja vynosnyh opor i stroitel'noj tehniki. Pat. CN 103359080 A. 23.10.2013. patent [in Chinese]
23. Reinhold Ost, Klaus Haerle, Stefan Amendt. Measurement system for determining support force. pat.US 010308487B2; - publ. 04.06.2019. patent [in English].
24. John F. Benton, Matthew T. Oswald, Stephen J.Schoonmaker. Outrigger pad monitoring system. pat.US 20140116975 A1. - publ. 01.05.2014. patent [in English].
25. Kadyrov A.S, Kadyrova I.A. *Osnovy nauchnyh issledovanii: Monografija*. Karaganda: KarGTU; 2015. – 278с. – textbook [in Russian].
26. Vainson A.A. *Podiemno-transportnye mashiny*. Moskva: Mashinostroenie;1989. – 536 с. – textbook [in Russian].
27. Sheffler M, Pajer G, Kurt F. *Osnovy rascheta i konstruirovania podiemno-transportnyh mashin*. Moskva: Mashinostroenie; 1980. – 255 с. – textbook [in Russian].
28. Dukel'skii A.I.. *Spravochnik po kranam*. Tom 1. Leningrad: Mashinostroenie; 1971. – 400с. – textbook [in Russian].
29. Shapiro L.K., Shapiro J.P. *Cranes and Derricks*. McGraw-Hill Companies. Fourth Edition. 2010. p.637. - textbook [in English].
30. Ali GM, Mansoor A, Liu S, Olearczyk J, Bouferguene A, Al-Hussein M. (2021). Simulation of ground bearing pressure profile under hydraulic crane outrigger mats for the verification of 16-point combined loading. *Procedia Computer Science* 180(3). p.482–491. Scientific article. [in English] DOI: [10.1016/j.procs.2021.01.264](https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.01.264)

Информация об авторах:

Хайытбаева Глория Базарбаевна – докторант образовательной программы 8D07113 «Транспорт, транспортная техника и технологии», Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан.

Мурзагалиев Ахмет Жакеевич – кандидат технических наук, доцент, Актюбинский региональный университет имени К.Жубанова, Актобе, Казахстан. email:amurzagaliev@zhubanov.edu.kz

Сазамбаева Баян Токушевна – доктор технических наук, профессор Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан.

Ордабаева Гүлсайра Муайыковна – старший преподаватель кафедры «Транспортная техника, организация перевозок и стротельства», АРУ им. К. Жубанова, Актобе, 030012,

Республика Казахстан, Актюбинский региональный университет имени К.Жубанова, Актөбе, Казахстан. e-mail:gulsairaordabaeva@gmail.com

Косыбаев Ж.З. – кандидат педагогических наук, доцент кафедры «Электроэнергетика», ЕНУ им. Л.Н. Гумилева, К. Сатпаева, 2, 010000, Астана, Казахстан

Хайытбаева Глория Базарбаевна – Л. Н.Гумилев атындағы Еуразия Ұлттық Университетінің, 8D07113 «Көлік, көлік техникасы және технологиялары» білім беру бағдарламасының докторанты, Астана, Қазақстан.

Мурзагалиев Ахмет Жакеевич – техника ғылымдарының кандидаты, доцент, Қ.Жұбанов атындағы Ақтөбе өңірлік университеті, Ақтөбе, Қазақстан, email:amurzagaliyev@zhubanov.edu.kz

Сазамбаева Баян Токушевна – техника ғылымдарының докторы, профессор, Л. Н. Гумилев атындағы Еуразия Ұлттық Университеті, Астана, Қазақстан.

Ордабаева Гүлсайра Муайыковна – аға оқытушы, Қ.Жұбанов атындағы Ақтөбе өңірлік университеті, Ақтөбе, Қазақстан. e-mail:gulsairaordabaeva@gmail.com

Қосыбаев Ж.З. – педагогика ғылымдарының кандидаты, «Электр энергетикасы» кафедрасының доценті, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Қ. Сәтбаев көш., 2, 010000, Астана, Қазақстан.

Khayitbayeva Gloriya Bazarbaevna – doctoral student of the educational program 8D07113 - «Transport, transport technique and technologies», L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan.

Murzagaliyev Akhmet Zhakiyevich – Candidate of Technical Sciences, Aktobe Regional University named after K. Zhubanov, Aktobe, Kazakhstan. email:amurzagaliyev@zhubanov.edu.kz

Sazambayeva Bayan Tokushevna – Doctor of Technical Sciences, Professor, L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan;

Ordabayeva Gulsaira Muayikovna – Senior lecturer, Aktobe Regional University named after K. Zhubanov, Aktobe, Kazakhstan. e-mail:gulsairaordabaeva@gmail.com

Kosybayev Zh.Z. – Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor of the Department of "Electric Power Engineering", L.N. Gumilyov Eurasian National University, 2 Satpayev St., 010000, Astana, Kazakhstan



Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).



IRSTI 50.41.29

Article

<https://doi.org/10.32523/2616-7263-2026-154-1-249-262>

Enhancing user experience through advanced sentiment analysis

A.K. Aitim  , M.A. Abdulla  *

International Information Technology University, Almaty, Kazakhstan

E mail: a.aitim@iitu.edu.kz, muslima.abaykyzy@gmail.com

Abstract. The rapid growth of user-generated textual content on social media platforms, messaging applications, e-commerce websites, and online services has increased the importance of automated sentiment analysis for understanding public opinion and improving digital services. The aim of this research is to investigate modern Natural Language Processing (NLP) approaches for sentiment analysis and to develop an effective method for analyzing and summarizing consumer reviews in order to enhance user experience. The scientific significance of the study lies in exploring advanced machine learning and deep learning techniques for processing large volumes of unstructured textual data and identifying emotional patterns in user feedback. The research methodology includes text preprocessing, tokenization, vectorization using transformer-based representations, and sentiment classification using Long Short-Term Memory (LSTM) models and machine learning algorithms. The results show that deep learning models improve the accuracy of sentiment detection and enable more reliable analysis of user opinions expressed in textual data. The findings contribute to the development of efficient analytical tools for sentiment analysis and provide practical support for businesses in understanding consumer preferences and improving the quality of digital services.

Keywords: sentiment analysis, natural language processing, user experience, LSTM networks, text classification.

Introduction

Sentiment analysis systems apply natural language processing and machine learning algorithms to text data. Preprocessing steps like tokenization and part-of-speech tagging prepare the data. For machine learning techniques, systems are first trained on annotated sentiment data. Then, they apply that knowledge to determine the sentiment in the new text. Systems might examine word choices, grammar constructs, and linguistic patterns to gauge sentiment. Various methods and models exist to leverage in sentiment analysis, each has its pros and cons, and most suitable cases to be efficient [1].

BERT (Bidirectional Encoder Representations from Transformers): Used for tasks like text classification, named entity recognition, and question answering [2]. Additionally, RoBERTa, DistilBERT, and XLNet were examined for performance in recognizing emotions in text. The models successfully recognized emotions expressed in written text, such as joy, humiliation, guilt, fear, anger, disgust, and sadness. RoBERTa achieved the top accuracy score of 0.74. The model needs to be made more general [3].

A hybrid method based on attributes to analyze consumers' intelligence by detecting characteristics through POS tags. The method needs to identify a greater number of subjects that cover all attributes while reducing computational expenses. Additionally, the research should encompass short text categorization and hybrid approaches, while also removing human labeling of attribute specific words in current lexicons [4].

A classification system based on specific factors with the use of Long-Short-Term Memory (LSTM) models [5]. LSTM by incorporating a combination of LSTM and a recurrent add-on network.

A combination of ARM techniques to extract characteristics is an option as well, with the possible five different strategies to utilize them. Due to the context disregarding implicit words, only explicit elements were retrieved [6]. The F-measure reached 75.51 percent. Challenges in this approach: Certain elements of the hybrid association rule mining prove challenging to manage in real-world scenarios.

The methodology

Sentiment analysis (SA) techniques, such as the SentiDiff algorithm, integrate sentiment diffusion patterns with textual information to improve sentiment analysis outcomes on Twitter datasets [7]. A process called sentiment reversal and identified multiple intriguing features linked to sentiment reversals [8]. Then examining the links between text content in Twitter posts and how emotions spread to forecast sentiment orientations from Twitter posts. Extensive tests on an actual dataset demonstrate that the suggested method enhances the area under the Precision-Recall curve for Twitter sentiment analysis compared to current SA techniques that are based on textual information [9].

Zhu et al. propose SentiVec as a method for optimizing sentiment word embedding kernels [10]. The initial stage of the study includes supervised learning, while the subsequent stage involves unsupervised updating models such as O2SR and C2OR [11]. Experimental results show that sentiment vectors with the best performance can accurately capture both semantics and sentiment in comparison to baseline methods, exceeding their performance on tasks like word analogy, similarity, and sentiment analysis [12].

Aspect-based sentiment analysis (ABSA) techniques includes a framework for text processing that could summarize reviews [13]. Within this framework, the goal is to identify the broad

categories mentioned in review sentences. There are two methods to achieve this. The initial method suggested is an autonomous process that identifies aspect categories by utilizing association rule mining on co-occurrence frequency data derived from a corpus. The proposed unsupervised technique exceeds many simple baselines with a 67 percent F1-measure. Alternative ABSA hybrid method for examining smart app review entities by combining domain lexicons and rules. This approach involves the use of language processing methods, rules, and lexicons to tackle various difficulties in sentiment analysis, leading to the creation of condensed outcomes [14]. The accuracy of aspect extraction sees a significant improvement when implicit factors are considered [15].

A method called Cross-Lingual Sentiment Classification to create a detailed aspect-level system by aligning topics across groups [16]. The AOS model combines aspects, opinions, and sentiments in reviews across different domains using a coarse alignment method to improve latent feature representation [17]. To enhance AOS further, a partly supervised AOS model that utilizes labeled data from the source language to minimize the discrepancy in feature representations between two language domains through logistic regression. Findings from extensive experiments on various multilingual product review datasets show that this method surpasses multiple cutting-edge methods by a wide margin [18]. There was a major challenge in sentiment analysis by addressing the presence of bipolar words in SA to enhance aspect-based sentiment analysis. The root is analyzing how words shift in meaning based on context, how this affects product ratings, and specific aspects, yielding notable findings [19].

Another automated approach to analyzing sentiments of evolving elements in customer reviews collected from various sources via web scraping to address the cold start problem. The accuracy of the system was enhanced by the addition of new stop words. Another method relies on three broad stages divided into multiple detailed operations. In the initial phase, the preliminary polarity lexicon and aspect word sets, serving as representations of aspects, are chosen to extract existing domain knowledge from the dataset [20]. These two resources are used as basic input for an expectation-maximization algorithm that calculates the likelihood of a word considering its aspect and emotion.

Deep learning-based SA methods have been utilized in the field of sentiment analysis to enhance effectiveness in recent times [21]. The initial end-to-end semi-supervised Multi-task Learning framework (SEML) for conducting ABSA on user reviews. Aspect mining and aspect sentiment classification in ABSA are both taught simultaneously in a combined session. SEML generate unified representations of reviews from a combination of three stacked and bidirectional neural layers. MAGRU enhances GRU by incorporating the moving-window attention mechanism to capture extensive contextual information. The suggested model incorporates Cross-View Training (CVT) to train additional prediction modules on unlabeled reviews, improving representation learning.

The proposed novel model, named Attention Emotion Enhanced (AEC)-LSTM enhances the LSTM network performance by integrating an attention mechanism and emotional intelligence. Initially, a new type of LSTM network is introduced, called ELSTM, that incorporates emotions to improve learning by utilizing an emotion modulator and estimator to boost the feature learning capacity of LSTM networks. With combined ELSTM with additional processes such as convolution, pooling, and concatenation it offers an improved depiction of diverse structural patterns in textual sequences. Next, the weight of hidden representations of text is adaptively adjusted through the use of the topic-level attention mechanism.

Pre-processing, identification of aspects, analysis of polarity, and categorization of sentiment are all stages of the model being suggested. Initially, the demonetization tweets from the Kaggle data set was collected and prepared. Aspect extraction is utilized to extract sentiment words from processed data. Through the use of polarity measure calculation and Word2vec, these identified aspect words are converted into attributes. The polarity measures were improved by combining the FireFly Algorithm (FF) and Multi-Verse Optimization (MVO) to create a new algorithm named FireFly-oriented Multi-Verse Optimizer (FF-MVO). Next, the combined features are fed into a Recurrent Neural Network (RNN) to classify sentiments as either positive or negative.

A common use for a sentiment analysis model is to determine if a text conveys positivity, negativity, or neutrality. However, this process typically requires access to plain text, which can potentially raise privacy concerns. Fully Homomorphic Encryption (FHE) permits performing calculations on encrypted data without requiring decryption beforehand. This makes it ideal for situations where a user's personal and possibly confidential information is in danger (such as analyzing emotions in private messages). Initiating the process by bringing in the necessary materials for transformers. To utilize the well-known library by Hugging Face to swiftly obtain a transformer. The BERT transformer model was selected, as shown in Fig. 1.

```
import torch
from transformers import
AutoModelForSequenceClassification, AutoTokenizer
device = "cuda:0" if torch.cuda.is_available() else
"cpu"
# Load the tokenizer (converts text to tokens)
tokenizer =
AutoTokenizer.from_pretrained("cardiffnlp/twitter-rober
ta-base-sentiment-latest")
# Load the pre-trained model
transformer_model =
AutoModelForSequenceClassification.from_pretrained(
    "cardiffnlp/twitter-roberta-base-sentiment-latest"
)
```

Figure 1. Downloading the model that ready to be used [22]

Tokenizing involves dividing the text into tokens and assigning a numerical value to each one as demonstrated in Figure 2. After that, we input the tokenized text into the transformer model, which generates a hidden representation, which result of the self-attention layers that are frequently utilized as input in the classification layers for each individual word. Ultimately, we calculate the mean of the word representations to obtain a representation at the text level. The outcome is a matrix with dimensions –number of samples, hidden size. The hidden size refers to the number of dimensions in the hidden representation. BERT has a hidden size of 768. The concealed representation is a numerical vector that depicts the text and can be applied to various tasks as shown in Fig. 3. In this instance, we'll employ it for classification using XGBoost later.

```
def text_to_tensor(
    list_text_X_train: list,
    transformer_model:
    AutoModelForSequenceClassification,
    tokenizer: AutoTokenizer,
    device: str,
) -> np.ndarray:
    # Tokenize each text in the list one by one
    tokenized_text_X_train_split = []
    tokenized_text_X_train_split = [
        tokenizer.encode(text_x_train,
            return_tensors="pt")
        for text_x_train in list_text_X_train
    ]
```

Figure 2. Downloading the model that ready to be used [26]

```
# Let's vectorize the text using the transformer
list_text_X_train = text_X_train.tolist()
list_text_X_test = text_X_test.tolist()
```

Figure 3. Vectorizing the text using transformer [22]

After preparing our training and test sets for classifier training, the next step is to train our Fully Homomorphic Encryption (FHE) model. It will be simple to do with a hyper-parameter tuning tool like GridSearch from scikit-learn. The output is as follows in Fig.4:

```
Best score: 0.8378111718275654
Best parameters: {'max_depth': 1, 'n_bits': 3,
'n_estimators': 50, 'n_jobs': -1}
```

Figure 4. Received output [22]

Now, we will make predictions on encrypted text. The concept is to encrypt the transformer's output instead of the original text. By enabling `execute_in_fhe=True` in the `predict` function in Concrete-ML, you can accomplish this task swiftly which is demonstrated in Fig. 5. This feature is specifically for developers to test the execution time of the FHE model. Further along, we will explore how to successfully implement this in a deployment environment and get the results as shown in Fig. 6.

```
start = time.perf_counter()
decrypted_proba =
best_model.predict_proba(X_tested_tweet,
execute_in_fhe=True)
end = time.perf_counter()
fhe_exec_time = end - start
print(f"FHE inference time: {fhe_exec_time:.4f}
seconds")
```

Figure 5. Predicting with FHE over a single tweet, including the estimated time [22]

```
Probabilities from the FHE inference: [0.08434131  
0.05571389 0.8599448]  
Probabilities from the clear model: [0.08434131  
0.05571389 0.8599448 ]
```

Figure 6. Read output [22]

The total settlement was (1.64) mm at a load of (100) tons (working load) and the total settlement was (6.46) mm at a load of (200) tons (equal to 200% of working load) in the second

In today's world, we are encompassed by a variety of gadgets for recording, such as smartphones, computers, tablets, smartwatches, and video cameras, among others. Yet, traditional methods for handling signals from multiple devices cannot be used together due to the requirement of simultaneous recording. Currently, microphone array processing available for purchase is constrained to using a single device with all microphones mounted on it.

Depending on your preferred method of analysis, sound can be broken down into several parts. We will divide sound into two primary categories for the purposes of this article: amplitude and frequency. Pitch, Formant, Bandwidth, Sampling Rate, and other components (overtones, harmonics, etc.) can be further separated out of the frequency components. Amplitude, as previously mentioned, controls a sound's volume. Sound wave strength is measured by loudness. The amount of energy a sound has over a space is its intensity. If you hear the same sound in a smaller space, it sounds louder. Higher intensity noises are generally referred to as louder. Therefore, amplitude is a measurement of energy. The amplitude of a wave increases with its energy. Intensity rises in tandem with amplitude. The number of samples a sound contains per second is its sample rate, also known as sampling frequency. For instance, a recording lasting five seconds will have 20,000 samples if the sampling rate is 4000 hertz. Pitch refers to the frequency at which the waveform repeats itself, which is the fundamental component of sound. As an example, there is a tool DeepSpeech, which provides qualitative performance. It starts with initiation, as in Fig. 7, it is important to consider that only 16 kilohertz (kHz) .wav files are used.

```
# Install DeepSpeech  
pip3 install deepspeech  
  
# Download pre-trained English model files  
curl -LO  
https://github.com/mozilla/DeepSpeech/releases/download/v0.9.3/d  
eepspeech-0.9.3-models.pbmm  
curl -LO  
https://github.com/mozilla/DeepSpeech/releases/download/v0.9.3/d  
eepspeech-0.9.3-models.scorer
```

Figure 7. Installation [22]

The `__init__` function of the `VADAudio` class initializes with parameters for a callback, device, input rate, and file, with default values for everything but the input rate. The class sets up an instance method `proxy_callback` that returns the `PyAudio` signal after calling the callback.

During initialization, it assigns the callback to handle audio data, creates a buffer queue, sets the device and input rate, and calculates the block size based on the sample rate. A `PyAudio` stream

is created with parameters like format, channels, and rate, and the aggressiveness of background noise filtering is set. If a device is provided, it is used as the input device, or if a file is passed, the chunk size is set, and the file is opened for reading.

The class contains six functions: `resample`, `read_resampled`, `read`, `write_wav`, a frame generator, and a voice activity detection (VAD) collector. The `resample` function adjusts audio data to a 16 kHz sample rate. The `read` and `read_resampled` functions handle reading raw and resampled audio data, respectively. The `write_wav` function writes audio data to a WAV file, which is shown in Fig. 8. The frame generator yields raw or resampled data based on the input rate.

```
def write_wav(self, filename, data):
    logging.info("write wav %s", filename)
    wf = wave.open(filename, 'wb')
    wf.set_channels(self.CHANNELS)
    # wf.setsampwidth(self.pa.get_sample_size(FORMAT))
    assert self.FORMAT == pyaudio.paInt16
    wf.setsampwidth(2)
    wf.setframerate(self.sample_rate)
    wf.writeframes(data)
    wf.close()
```

Figure 8. Function that writes data to an output file [22]

The utilization of the spatial diversity provided by multiple audio devices without the need for wired networking is a significant challenge, leading to extensive research efforts in the past decade due to its potential practical and commercial advantages.

WASNs have emerged as a fresh approach to acoustic sensing, aiming to address the constraints of stand-alone devices. By addressing new issues in managing asynchronous channels, unknown microphone positions, and distributed computing, in addition to enabling wireless communication between microphone nodes, the WASN allows us to distribute multiple recording devices spatially. These could encompass a broader range and make use of the nodes to create a larger microphone array. It guarantees a major enhancement in the efficiency of different audio assignments, like improving speech quality, recognizing speech, identifying speakers, analyzing scenes, and detecting unusual sounds.

Although it might be challenging to assign a strict classification to spatial audio techniques, many of them fall into one of two general categories: model-based or data-based. In the past, model-based techniques created sound scopes using discrete virtual sound sources that are powered by a set of audio input signals and analytically defined by mathematical or physical models. Model-based techniques include vector base amplitude panning (VBAP), stereophonic amplitude panning (WFS), and others. Conversely, data-driven spatial audio techniques use sound scene representations, where the audio waves contain spatial information stored in them.

The source of the spatial data may come from simulations, acoustic measurements, or array recordings. Social media is a vital tool for community discussion and information sharing about a wide range of events. Creating datasets from three specific social media platforms-Instagram, Snapchat, and Twitter is used to investigate the quality of the sentiment analysis (SA) of impressions about. WhatsApp is the most appropriate platform for expressing negative emotions, followed by Facebook, Twitter, and Instagram, according to the analysis of the samples and the methods. Perceived fit for WhatsApp was highest for conveying pleasant emotions, followed by Instagram, Facebook, and Twitter. All that the system offers is a comparison between these four

platforms. The RF methodology was the main method used, and it had a 94% accuracy rate in predicting results. The fact that the data collection period was so brief, just one month, came with certain restrictions. Taking twitter data set as an example, a visualization of sentiment analysis. The first step is exploring the dataset, as shown in Fig.9.

```
import pandas as pd

data = pd.read_csv('training.csv', encoding='ISO-8859-1', header=None)
column_names = ['target', 'ids', 'date', 'flag', 'user', 'text']
data.columns = column_names
head = data.head()
info = data.info()
describe = data.describe()
head, info, describe
```

Figure 9. Exploring dataset [22]

Insights received as:

- The dataset has 1.6 million tweets, with no missing values in any column.
- Each tweet has a target sentiment (0 for negative, 2 neutral, 4 for positive), an ID, a timestamp, a flag (query or 'NO_QUERY'), the username, and the text.
- The sentiment targets are balanced, with an equal number of positive and negative labels [8]. Further step is visualising received insights and dividing positive and negative ones, which is demonstrated in Fig. 10. Visualized picture of the output is provided below in Fig. 11.

```
column
positive_tweets = data[data['target'] == 4]['text']
negative_tweets = data[data['target'] == 0]['text']

sample_positive_text = " ".join(text for text in
positive_tweets.sample(frac=0.1, random_state=23))
sample_negative_text = " ".join(text for text in
negative_tweets.sample(frac=0.1, random_state=23))

sentiments
wordcloud_positive = WordCloud(width=800, height=400,
max_words=200,
background_color="white").generate(sample_positive_text)
wordcloud_negative = WordCloud(width=800, height=400,
max_words=200,
background_color="white").generate(sample_negative_text)

plt.figure(figsize=(15, 7.5))
# Positive word cloud
plt.subplot(1, 2, 1)
plt.imshow(wordcloud_positive, interpolation='bilinear')
plt.title('Positive Tweets Word Cloud')
plt.axis("off")
# Negative word cloud
plt.subplot(1, 2, 2)
plt.imshow(wordcloud_negative, interpolation='bilinear')
plt.title('Negative Tweets Word Cloud')
plt.axis("off")

plt.show()
```

Figure 10. Selecting positive and negative tweets and combine them together [22]

Conclusion

Overall, the results indicate that while several sentiment analysis techniques and models demonstrate high performance, challenges remain in generalization, managing implicit contextual elements, and addressing privacy concerns. Future research should focus on refining hybrid methods, improving cross-lingual sentiment analysis, and leveraging advanced encryption techniques to ensure the safe and effective application of sentiment analysis across various domain.

Acknowledgment

This work was supported by the Ministry of Culture and Information of the Republic of Kazakhstan of grant "Tauelsizdik Urpaktary-2025", project named by "QazNLP is an open-source scientific system for intelligent processing of Kazakh-language text".

The contribution of the authors:

A.K.Aitim - general guidance, supervising, idea, problem setting, concept, methodology, critical review of content, final decision, final editing.

M.A.Abdulla - solving theoretical issues, data collection, article design, analysis, visualization, interpretation, conclusion, editing.

References

1. Hochreiter, S., & Schmidhuber, J. (1997). Long short-term memory. *Neural Computation*, 9(8), 1735–1780. <https://doi.org/10.1162/neco.1997.9.8.1735>
2. Devlin, J., Chang, M. W., Lee, K., & Toutanova, K. (2019). BERT: Pre-training of deep bidirectional transformers for language understanding. *Proceedings of NAACL-HLT*, 4171–4186. <https://doi.org/10.18653/v1/N19-1423>
3. Vaswani, A., Shazeer, N., Parmar, N., Uszkoreit, J., Jones, L., Gomez, A. N., Kaiser, L., & Polosukhin, I. (2017). Attention is all you need. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 30. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1706.03762>
4. Tang, D., Qin, B., & Liu, T. (2015). Document modeling with gated recurrent neural network for sentiment classification. *Proceedings of EMNLP*, 1422–1432. <https://doi.org/10.18653/v1/D15-1167>
5. Liu, B. (2012). Sentiment analysis and opinion mining. *Synthesis Lectures on Human Language Technologies*, 5(1), 1–167. <https://doi.org/10.2200/S00416ED1V01Y201204HLT016>
6. Aitim, A. (2024). Developing methods for automatic processing systems of Kazakh language. *KazATC Bulletin*, 133(4), 254–265. <https://doi.org/10.52167/1609-1817-2024-133-4-254-265>
7. Aitim, A., & Satybaldiyeva, R. (2024). A systematic review of existing tools to automated processing systems for Kazakh language. *Bulletin of Abai KazNPU. Series of Physical and Mathematical Sciences*, 87(3), 106–122. <https://doi.org/10.51889/2959-5894.2024.87.3.009>
8. Hoang, M., Bihorac, O. A., & Rouces, J. (2019). Aspect-based sentiment analysis using BERT. *Proceedings of the Nordic Conference on Computational Linguistics*, 187–196. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1904.05064>

9. Bello, A., et al. (2023). A BERT framework to sentiment analysis of tweets. *Sensors*, 23, 506. <https://doi.org/10.3390/s23010506>
10. Liu, N., Li, Y., & Liu, Y. (2022). A BERT-based aspect-level sentiment analysis algorithm for cross-domain text. *Applied Sciences*, 12, 6637. <https://doi.org/10.3390/app12136637>
11. Atlas, L. G., et al. (2025). A novel sentence-level sentiment analysis approach for mining online product reviews. *Scientific Reports*, 15, 1104. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-01104-0>
12. Zhang, H., & Li, J. (2025). Hybrid CNN–LSTM model for social media sentiment analysis. *Scientific Reports*, 15, 1104. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-01104-0>
13. Mandhasiya, D. G., Murfi, H., & Bustamam, A. (2024). The hybrid of BERT and deep learning models for Indonesian sentiment analysis. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 33(1), 591–602. <https://doi.org/10.11591/ijeecs.v33.i1.pp591-602>
14. Aitim, A. (2025). Building a high-quality annotated corpus for Kazakh NLP: A pipeline approach. *Vestnik KazUTB*, 4(29). <https://doi.org/10.58805/kazutb.v.4.29-1092>
15. Zhang, X., Liu, Y., & Chen, H. (2025). A BERT–BiLSTM–attention framework for robust sentiment classification. *Systems*, 13, 964. <https://doi.org/10.3390/systems13110964>
16. Acheampong, F. A., Nunoo-Mensah, H., & Chen, W. (2020). Comparative analyses of BERT, RoBERTa, DistilBERT, and XLNet for text-based emotion recognition. *IEEE Access*, 8, 83632–83643. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2992247>
17. Mao, Y., Liu, Q., Zhang, H., & Deng, Z. (2024). Sentiment analysis methods, applications, and challenges: A systematic literature review. *Journal of King Saud University – Computer and Information Sciences*, 36, 102048. <https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2024.102048>
18. Zhang, L., Wang, S., & Liu, B. (2018). Deep learning for sentiment analysis: A survey. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Data Mining and Knowledge Discovery*, 8(4), e1253. <https://doi.org/10.1002/widm.1253>
19. Sun, C., Huang, L., & Qiu, X. (2019). Utilizing BERT for aspect-based sentiment analysis via constructing auxiliary sentence. *Proceedings of NAACL-HLT*, 380–385. <https://doi.org/10.18653/v1/N19-1035>
20. Socher, R., Perelygin, A., Wu, J., Chuang, J., Manning, C., Ng, A., & Potts, C. (2013). Recursive deep models for semantic compositionality over a sentiment treebank. *Proceedings of EMNLP*, 1631–1642. <https://doi.org/10.18653/v1/D13-1170>
21. Aitim, A., & Abdulla, M. (2024). Data processing and analysing techniques in UX research. *Procedia Computer Science*, 251, 591–596. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2024.11.154>
22. QNLP – Full Kazakh NLP Suite GitHub repository. (2025). Retrieved from <https://github.com/Aigerimhub/qnlp>

Ә.Қ. Әйтiм, М.А. Абдулла*

Халықаралық ақпараттық технологиялар университетi, Алматы, Қазақстан

Жетiлдiрiлген көңiл-күйдi талдау арқылы пайдаланушы тәжiрибесiн жақсарту

Аңдатпа. Әлеуметтік медиа платформаларында, хабар алмасу қосымшаларында, электрондық коммерция сайттарында және басқа да онлайн сервистерде пайдаланушылар жасайтын мәтіндік контенттің жылдам өсуі қоғамдық пікірді түсіну және цифрлық

қызметтердің сапасын жақсарту үшін автоматтандырылған көңіл-күйді талдаудың маңыздылығын арттырды. Бұл зерттеудің мақсаты – көңіл-күйді талдау үшін заманауи табиғи тілді өңдеу (Natural Language Processing, NLP) тәсілдерін зерттеу және пайдаланушылардың пікірлерін талдау мен қорытындылау үшін пайдаланушы тәжірибесін жетілдіруге арналған тиімді әдіс ұсыну. Зерттеудің ғылыми маңыздылығы үлкен көлемдегі құрылымдалмаған мәтіндік деректерді өңдеу және пайдаланушылардың пікірлеріндегі эмоциялық заңдылықтарды анықтау үшін машиналық оқыту мен терең оқыту әдістерін зерттеуде көрінеді. Зерттеу әдістемесі мәтінді алдын ала өңдеуді, токенизацияны, трансформерлік модельдер негізінде векторизацияны, сондай-ақ Long Short-Term Memory (LSTM) модельдері мен машиналық оқыту алгоритмдерін қолдану арқылы көңіл-күйді жіктеуді қамтиды. Зерттеу нәтижелері терең оқыту модельдері көңіл-күйді анықтау дәлдігін арттырып, мәтіндік деректердегі пайдаланушылар пікірін неғұрлым сенімді талдауға мүмкіндік беретінін көрсетеді. Алынған нәтижелер көңіл-күйді талдауға арналған тиімді аналитикалық құралдарды дамытуға үлес қосады және тұтынушылардың қалауын түсіну мен цифрлық қызметтердің сапасын арттыруда бизнеске практикалық қолдау көрсетеді.

Түйін сөздер: көңіл-күйді талдау, табиғи тілді өңдеу, пайдаланушы тәжірибесі, LSTM желілері, мәтінді жіктеу.

Ә.Қ. Әйтiм, М.А. Абдулла*

Международный университет информационных технологий, Алматы, Казахстан

Повышение пользовательского опыта за счет расширенного анализа настроений

Аннотация. Стремительный рост пользовательского текстового контента на платформах социальных сетей, в приложениях для обмена сообщениями, на сайтах электронной коммерции и других онлайн-сервисах значительно повысил значимость автоматического анализа тональности для понимания общественного мнения и улучшения цифровых сервисов. Цель данного исследования заключается в изучении современных подходов к обработке естественного языка (Natural Language Processing, NLP) для анализа тональности и разработке эффективного метода анализа и обобщения пользовательских отзывов с целью улучшения пользовательского опыта. Научная значимость работы заключается в исследовании современных методов машинного обучения и глубокого обучения для обработки больших объемов неструктурированных текстовых данных и выявления эмоциональных закономерностей в пользовательских отзывах. Методология исследования включает предварительную обработку текста, токенизацию, векторизацию с использованием трансформерных представлений, а также классификацию тональности с применением моделей Long Short-Term Memory (LSTM) и алгоритмов машинного обучения. Результаты исследования показывают, что модели глубокого обучения повышают точность определения тональности и обеспечивают более надежный анализ мнений пользователей, выраженных в текстовых данных. Полученные результаты способствуют развитию эффективных аналитических инструментов для анализа тональности и имеют практическое значение для бизнеса при изучении предпочтений потребителей и повышении качества цифровых сервисов.

Ключевые слова: анализ тональности, обработка естественного языка, пользовательский опыт, сети LSTM, классификация текста.

References

1. Hochreiter, S., & Schmidhuber, J. (1997). Long short-term memory. *Neural Computation*, 9(8), 1735–1780. <https://doi.org/10.1162/neco.1997.9.8.1735>
2. Devlin, J., Chang, M. W., Lee, K., & Toutanova, K. (2019). BERT: Pre-training of deep bidirectional transformers for language understanding. *Proceedings of NAACL-HLT*, 4171–4186. <https://doi.org/10.18653/v1/N19-1423>
3. Vaswani, A., Shazeer, N., Parmar, N., Uszkoreit, J., Jones, L., Gomez, A. N., Kaiser, L., & Polosukhin, I. (2017). Attention is all you need. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 30. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1706.03762>
4. Tang, D., Qin, B., & Liu, T. (2015). Document modeling with gated recurrent neural network for sentiment classification. *Proceedings of EMNLP*, 1422–1432. <https://doi.org/10.18653/v1/D15-1167>
5. Liu, B. (2012). Sentiment analysis and opinion mining. *Synthesis Lectures on Human Language Technologies*, 5(1), 1–167. <https://doi.org/10.2200/S00416ED1V01Y201204HLT016>
6. Aitim, A. (2024). Developing methods for automatic processing systems of Kazakh language. *KazATC Bulletin*, 133(4), 254–265. <https://doi.org/10.52167/1609-1817-2024-133-4-254-265>
7. Aitim, A., & Satybaldiyeva, R. (2024). A systematic review of existing tools to automated processing systems for Kazakh language. *Bulletin of Abai KazNPU. Series of Physical and Mathematical Sciences*, 87(3), 106–122. <https://doi.org/10.51889/2959-5894.2024.87.3.009>
8. Hoang, M., Bihorac, O. A., & Rouces, J. (2019). Aspect-based sentiment analysis using BERT. *Proceedings of the Nordic Conference on Computational Linguistics*, 187–196. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1904.05064>
9. Bello, A., et al. (2023). A BERT framework to sentiment analysis of tweets. *Sensors*, 23, 506. <https://doi.org/10.3390/s23010506>
10. Liu, N., Li, Y., & Liu, Y. (2022). A BERT-based aspect-level sentiment analysis algorithm for cross-domain text. *Applied Sciences*, 12, 6637. <https://doi.org/10.3390/app12136637>
11. Atlas, L. G., et al. (2025). A novel sentence-level sentiment analysis approach for mining online product reviews. *Scientific Reports*, 15, 1104. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-01104-0>
12. Zhang, H., & Li, J. (2025). Hybrid CNN–LSTM model for social media sentiment analysis. *Scientific Reports*, 15, 1104. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-01104-0>
13. Mandhasiya, D. G., Murfi, H., & Bustamam, A. (2024). The hybrid of BERT and deep learning models for Indonesian sentiment analysis. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 33(1), 591–602. <https://doi.org/10.11591/ijeecs.v33.i1.pp591-602>
14. Aitim, A. (2025). Building a high-quality annotated corpus for Kazakh NLP: A pipeline approach. *Vestnik KazUTB*, 4(29). <https://doi.org/10.58805/kazutb.v.4.29-1092>
15. Zhang, X., Liu, Y., & Chen, H. (2025). A BERT–BiLSTM–attention framework for robust sentiment classification. *Systems*, 13, 964. <https://doi.org/10.3390/systems13110964>

16. Acheampong, F. A., Nunoo-Mensah, H., & Chen, W. (2020). Comparative analyses of BERT, RoBERTa, DistilBERT, and XLNet for text-based emotion recognition. *IEEE Access*, 8, 83632–83643. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2992247>
17. Mao, Y., Liu, Q., Zhang, H., & Deng, Z. (2024). Sentiment analysis methods, applications, and challenges: A systematic literature review. *Journal of King Saud University – Computer and Information Sciences*, 36, 102048. <https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2024.102048>
18. Zhang, L., Wang, S., & Liu, B. (2018). Deep learning for sentiment analysis: A survey. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Data Mining and Knowledge Discovery*, 8(4), e1253. <https://doi.org/10.1002/widm.1253>
19. Sun, C., Huang, L., & Qiu, X. (2019). Utilizing BERT for aspect-based sentiment analysis via constructing auxiliary sentence. *Proceedings of NAACL-HLT*, 380–385. <https://doi.org/10.18653/v1/N19-1035>
20. Socher, R., Perelygin, A., Wu, J., Chuang, J., Manning, C., Ng, A., & Potts, C. (2013). Recursive deep models for semantic compositionality over a sentiment treebank. *Proceedings of EMNLP*, 1631–1642. <https://doi.org/10.18653/v1/D13-1170>
21. Aitim, A., & Abdulla, M. (2024). Data processing and analysing techniques in UX research. *Procedia Computer Science*, 251, 591–596. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2024.11.154>
22. QNLP – Full Kazakh NLP Suite GitHub repository. (2025). Retrieved from <https://github.com/Aigerimhub/qnlp>

Information about the authors:

Aitim A.K. – PhD, Associate Professor, Department of Information Systems, International Information Technology University, Almaty, Kazakhstan

Abdulla M.A. – corresponding author, Bachelor of Engineering and Technology, International Information Technology University, Almaty, Kazakhstan

Әйтiм Ә.Қ. – PhD, ассоциированный профессор кафедры Информационных систем, Международный университет информационных технологий, Алматы, Казахстан.

Абдулла М.А. – автор для корреспонденции, бакалавр техники и технологий, Международный университет информационных технологий, Алматы, Казахстан.

Әйтiм Ә.Қ. – PhD, Ақпараттық жүйелер кафедрасының қауымдастырылған профессоры, Халықаралық ақпараттық технологиялар университеті, Алматы, Қазақстан

Абдулла М.А. – хат-хабар авторы, техника және технология ғылымдарының бакалавры, Халықаралық ақпараттық технологиялар университеті, Алматы, Қазақстан



Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

Бас редакторы: Б.Б. Тогизбаева
Компьютерде беттеген: А. Тулеков

Авторларға арналған нұсқаулықтар,
жарияланым этикасы журнал сайтында берілген: <http://bultech.enu.kz>

Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университетінің Хабаршысы.
Техникалық ғылымдар және технологиялар сериясы.
№1 (154)/2026 – Астана: ЕҰУ. – 263 б. Шартты б.т. – 15,4. Таралымы – сұраныс бойынша.

Басуға қол қойылды: 30.03.2026 ж.
Ашық қолданыстағы электронды нұсқа: <http://bultech.enu.kz>

Мазмұнына типография жауап бермейді

Редакция мекен-жайы: 010008, Қазақстан Республикасы, Астана қ., Сәтбаев көшесі, 2.
Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті
Тел.: +7(71-72) 70-95-00 (ішкі 31-315)

Л.Н. Гумилев атындағы
Еуразия ұлттық университетінің баспасында басылды.